

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Tribologické vlastnosti povrchů studované na lineárním tribometru**

**Tribological properties of surfaces studied on the linear tribometer**

*Liberec 2009*

*Paweł Malik*

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

Studijní program: M 2301 Strojní inženýrství  
Obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

**Tribologické vlastnosti povrchů studované na lineárním tribometru**

**Tribological properties of surfaces studied on the linear  
tribometer**

***Paweł Malik***

**KMT – 255**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Kolouch, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Dr. Inž. Jacek Grabarczyk

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 65

Počet tabulek: 3

Počet obrázků: 31

Datum: 03.06.2009



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

Katedra materiálů

Studijní rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Pawel M A L I K</b>
studijní program	<b>M2301 Strojní inženýrství</b>
obor	<b>2303 T 002 Strojírenská technologie</b>
zaměření	<b>Materiálové inženýrství</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Tribologické vlastnosti povrchů studované na lineárním tribometru**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proved'te posouzení dosud známých tribologických metod měření vlastností povrchů.
2. Navrhněte ideový námět na stavbu lineárního tribometru.
3. Navrhněte hlavní měřicí a řídicí elementy umožňující stavbu přístroje a připravte schéma zařízení osazené v rámci finančního limitu 180tis.Kč
4. Realizujte tribologické zkoušky různých povrchů na vhodném tribometru
5. Na základě výsledků doporučte další postup pro měření třecích vlastností povrchů.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 40- 50 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [ 1 ] ASM Handbook, Surface Technology, Volume 5, ASM International 1994
- [ 2 ] M.J.Neale, The Tribology Handbook, Elsevier, 1995
- [ 3 ] Marian Szczerek, Marek Wiśniewski "Tribologia i Tribotechnika" Instytut Technologii Eksploatacji 2000
- [ 4 ] Zbigniew Lawrowski "Tribologia- Tarcie zużywanie i smarowanie" Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2008
- [ 5 ] Marek Blicharski "Inżynieria powierzchni" Wydawnictwa naukowo - techniczne Sp. z o. o. Warszawa 2009

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Kolouch, Ph.D.

Konzultant diplomové práce : Dr. Inž. Jacek Grabarczyk

L.S.

doc. Ing. František STUHLÍK,CSc.

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.

vedoucí katedry

děkan

V Liberci dne 31.03. 2009

---

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ) Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

## **Adnotace**

Tato magisterská práce se zabývá technologickým projektem lineárního tribometru. V teoretické části jsou představeny nejdůležitější tribologické modely a základní formy využití. V praktické části jsou umístěny popisy různých konstrukčních řešení zařízení pro měření tření, projekt konstrukce podobného zařízení, včetně popisu. Byla uskutečněna diskuze nad závěry získanými v průběhu projektování zařízení.

## **Abstact**

The following thesis deals with the technological project of the linear tribometr. In the theoretical part were presented the most important tribological models and the basic form of its use. In a practical part were included descriptions of various results of construction devices, which are used to a friction tests, and construction project of similar device with its description. Moreover, the discussion of proposals obtained during designing device was carried.

## **Streszczenie**

Niniejsza praca magisterska zajmuje się projektem technologicznym tribometru liniowego. W części teoretycznej przedstawiono najważniejsze modele tribologiczne i podstawowe formy zużycia. W części praktycznej zamieszczono opisy różnych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń do badania tarcia, projekt konstrukcji podobnego urządzenia wraz z opisem. Została przeprowadzona dyskusja wniosków uzyskanych w czasie projektowania urządzenia.

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

Studentská 2, 461 17 Liberec

## **ANOTACE**

Diplomant: Paweł Malik  
Studijní program: M 2301 Strojní inženýrství  
Obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

Téma práce:

**Tribologické vlastnosti povrchů studované na lineárním tribometru**

**Tribological properties of surfaces studied on the linear  
tribometer**

Číslo diplomové práce: KMT – 255  
Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Kolouch, Ph.D.  
Konzultant diplomové práce: Dr. Inž. Jacek Grabarczyk

Klíčová slova: tření, tribometr lineární, trybologia  
Key words: friction, linear tribometr, tribology

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vzalozila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

### **Poděkování:**

*Děkuji rodičům za pomoc a podporu po celou dobu studia.*

*Srdečně děkuji prof. RNDr. Stanisławowi Miturze a prof. Ing. Petru Loudovi CSc. za veškerou podporu a pomoc během mého zahraničního pobytu v Liberci. Ing. Aleši Kolouch, Ph.D. a dr inž. Jackowi Grabarczykowi za cenné pokyny a čas, který mi věnovali během psaní této práce. Mé poděkování patří také, mgr inž. Mateuszowi Fijałkowskiemu, mgr inž. Zbyszkowi Rożkowi.*



### SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

T	Friction force	síla tření
P	Normal force	Normála síla
$\mu$	coefficient of friction	součinitel tření
C	value characterizing molecular interaction	Molekulární vliv
HB	Brinell hardness	Tvrdost podle Brinella
$\tau$	mean shear strength for the entire surface of a effective contact area	průměrné smykové pevnosti celého povrchu reálného kontaktu
Tg	tangent of the angle	tangens úhlu
$\alpha$	angle of friction	úhel tření
R <sub>e</sub>	yield strength	Mez kluzu
A <sub>1</sub>	furrow surface area	povrch žlábků
A	gradient of shear stress change with changes of tensile stress	skutečná plocha styku
$\tau_0$	Shear strength at tensile stress equal zero	Smykové pevnosti
A <sub>s</sub>	shear surface area	povrchu smyku
k	gradient of shear stress change with changes of tensile stress	Gradient změn styčných napětí se změnou normálních napětí
E	mean energy of particle tear	střední energie roztrhaní částic
q	statistical constant	Jistá statistická konstanta
l	distance between two atoms	vzdálenost sousedních atomů
n	general number of repeling particles	celkový počet se odpuzujících molekul
A <sub>r</sub>	surface of effective contact area	povrch skutečného styku
$\gamma$	adhesion work on surface of effective contact area	Práce přilnavost na jednotku plochy skutečného kontaktu
P <sub>c</sub>	force required for surface separation	Síla potřebná k separaci povrchu

$\alpha$ i $\beta$	parameters depending on mechanical and molecular properties of surface	parametrů závisí na mechanických a molekulárních vlastnostech povrchu
Hm	hardness of worn material	tvrdost použité kovové
Hs	hardness of abrasive	brusné tvrdosti
PA	Microwave Plasma CVD	Podporované plazmou
CVD	Chemical Vapour Deposition	Chemická depozice z plynné fáze
RF	Radio frequency	Rádiová frekvence
MW	Microwave frequency	Mikrovlna frekvence

## **OBSAH:**

<b>I. Úvod .....</b>	<b>13</b>
<b>II. Teoretická část .....</b>	<b>14</b>
2.1. Tribologické modely.....	14
2.1.1. Klasifikace modelů.....	14
2.1.2. Atributivní modely .....	14
2.1.2.1. Amontonsův model .....	14
2.1.2.2. Amontons Coulombův model .....	15
2.1.2.3. Ernst-Merchantův model.....	16
2.1.2.4. Bowdenův model .....	17
2.1.2.5. Epifanovův model .....	18
2.1.2.6. Srážkový model.....	18
2.1.3. Genetické modely.....	19
2.1.3.1. Tomlinsonův model .....	19
2.1.3.2. Děrjaginův model.....	20
2.1.3.3. Johnsonův model.....	21
2.1.4. Mechanicko molekulární model Kragielského .....	21
2.1.5. Mechanický Suhův model.....	22
2.2. Procesy opotřebení .....	23
2.2.1. Tribologické opotřebení.....	23
2.2.2. Oxidační opotřebení.....	23
2.2.3. Vodíkové opotřebení .....	24
2.2.4. Opotřebení třením .....	25
2.2.5. Únavové opotřebení.....	27

2.2.5.1.	Pitting .....	29
2.2.5.2.	Spalling .....	31
2.2.6.	Adhezivní opotřebení.....	32
<b>III.Praktická část .....</b>		<b>34</b>
3.1.	Příklady konstrukcí lineárních tribometrů .....	34
3.1.1.	Lineární tribometr T17 .....	34
3.1.2.	Stanoviště pro tribologická měření .....	36
3.1.3.	Tribometr TPZ .....	38
3.2.	Konstrukce a způsob činnosti tribometrů s otáčivým hlavním pohybem.....	40
3.2.1.	Testovací zařízení typu čep-kotouč T-01M .....	40
3.2.2.	Testovací zařízení typu váleček-destička T-05 .....	42
3.2.3.	Testovací zařízení typu čep-kotouč (pro měření za zvýšených teplot) .....	44
3.3.	Vlastnosti používaného materiálů .....	46
3.4.	Metoda magnetronového rozprašování ve vysokofrekvenčním poli RF- PACVD/DC .....	48
3.5.	Plazmová metoda v dvoufrekvenčním poli MW/RF-PACVD .....	49
3.6.	Výsledky testů .....	52
<b>IV.Opis a způsob použití zařízení.....</b>		<b>55</b>
<b>V.Diskuse o výsledcích a návrhy .....</b>		<b>59</b>
<b>VI.Závěr.....</b>		<b>61</b>
<b>VII.Seznam obrázků a tabulek.....</b>		<b>62</b>
<b>VIII.Literatura.....</b>		<b>64</b>

## **I. Úvod**

### **Co je to tribologie**

Tribologie je nauka o procesech, které probíhají v pohyblivém kontaktu pevných těles. Slovo tribologie je odvozeno od řeckých slov „tribos” – tření a „logos” – slovo, řeč, vědění. Používá se také pojem „tribotechnika”, který označuje především praktické využití tribologie, a „tribotechnologie”, který se vztahuje na existující technologie snižující opotřebení tribologických materiálů. Nicméně název „tribologie” je v současnosti na světě nejrozšířenější. Obor tribologie zahrnuje výzkum tření, opotřebení a mazání pohyblivých soustav za účelem poznání těchto procesů a možnosti jejich racionálního řízení. Vedle mechaniky, odolnosti materiálu a nauky o materiálech patří tribologie k základním vědám o konstrukci a provozu pohyblivých částí strojů, jako jsou: ložiska, vedení, převody, spojky, brzdy apod., z hlediska jejich funkčnosti, spolehlivosti a životnosti. Intenzivní vzdělání v oboru tribologie a využití těchto vědomostí v technice přináší obrovský užitek kvůli úsporám, dosaženým díky patřičným výpočtům a správnému výběru konstrukčních vlastností částí strojů. Tření je jev, který se v přírodě vyskytuje prakticky všude. Tento jev má pozitivní účinky (např. chůze) nebo negativní (např.: odpor při přemísťování předmětů). Procesy tření patří také v technice k nejčastějším, jak v pozitivním (např. využití třecího spojení: ve třecích spojkách, třecích převodech, při styku pojezdových kol s podkladem, využívané v brzdách) tak negativním smyslu (např. odpor kladený kluznému nebo valivému pohybu: v ložiskách, vedeních, ozubených převodech atd.). Tření, ke kterému dochází v rámci konkrétních tribotechnických soustav, je provázáno energetickými ztrátami a ztrátami způsobenými opotřebením: hmotnými a finančními. Opotřebení v důsledku tření má za následek nutnost výměny součástí, celků nebo strojů. Ztráty tím způsobené, včetně prostoje strojů, v mnoha případech několikanásobně překračují výrobní náklady na materiál a práci [1,2,5].

## **II. Teoretická část**

### **2.1. Tribologické modely**

#### **2.1.1. Klasifikace modelů**

Nejpočetněji jsou zastoupeny atributivní, genetické a strukturální modely.

Atributivní modely jsou založeny na spojení daného objektu s určitým atributem, tzn. takovou vlastností objektu, kterou nelze odstranit a bez které objekt nemůže existovat ani si jej nelze představit. Základními atributy tření je odpor kladený pohybu, který vzniká při styku pohybujících se těles a disipací energie.

Genetické modely odrážejí souvislost s jinými objekty, které existovaly před ním v čase nebo s jinými stavy stejného objektu.

Třetí skupinou jsou strukturální modely. Jsou založeny na stanovení vnitřních částí objektu a způsobu jejich spojení v jeden celek nebo na stanovení místa objektu, který je součástí nějaké větší soustavy.

#### **2.1.2. Atributivní modely**

První vznikající modely tření byly spojeny s pokusy o komplexní pojetí jevu, hlavně za účelem vysvětlení odporů kladených pohybu a s nimi spojených příčin vzniku síly tření. Vznikaly atributivní modely, které chápaly tření z kvalitativního hlediska a během dalšího vývoje popisovaly a snažily se vysvětlit vliv dalších a dalších faktorů na průběh tohoto procesu. Pro definici tření z kvantitativního hlediska byly formulovány vzorce, které určovaly hlavně sílu tření [3].

##### **2.1.2.1. Amontonsův model**

Amontons dokázal, že síla tření nezávisí na velikosti třecích ploch, ale je přímo úměrná normální síle. Amontons se ve svých úvahách opíral o čistě mechanické předpoklady, akceptoval názory Leonarda da Vinciho o drsnosti povrchové vrstvy. Domníval se, že tření vzniká v důsledku práce vykonané při posunu jednoho povrchu po nerovnostech druhého nebo v důsledku ohýbání a odtrhávání nerovností.

Amontons předpokládal, protože vycházel ze zásady, že pevná tělesa nemají plasticitu, model dokonale pevného tělesa a odmítal všechna fakta, která byla s touto zásadou v rozporu.

Úvahy Amontonse lze vyjádřit formálním modelem znázorňujícím sílu tření:

$$T = \mu P$$

kde: T- třecí síla, P – normální síla,  $\mu$  - součinitel úměrnosti (dnes nazývaný součinitel tření) [2].

Amontonsův současný, francouzský inženýr Parent zavedl pojem úhel tření. Parent zdůvodnil rovnost tangenty tohoto úhlu se součinitelem tření.

Amontons při vysvětlování odporu kladeného pohybu, který vzniká během tření, obrátil pozornost na úlohu normální síly a tvrdil, že na ní závisí síla tření. Jde o atributivní model, ve kterém je tření spojeno s odporem kladeným pohybu. Vzorec pro výpočet třecí síly předložený Amontonsem je prognostickým prvkem, který umožňuje stanovit součinitel tření. Během tvorby svého modelu Amontons použil daleko jdoucí zprůměrování, nezabýval se elementárními jevy, které působí odpor kladený pohybu. Přes dalekosáhlá zjednodušení, související hlavně s přijetím axiómu o nedeformovatelnosti materiálu, pomíjení plochy skutečného kontaktu, našel Amontonsův model uplatnění v technice a přispěl, mimo jiné, k přijetí stálých hodnot součinitele tření. Tento model má nejen historický význam, ale používá se i dnes při provádění výzkumů. Nesmíme však zapomínat, že často opomíjí očividné skutečnosti pozorované jinými badateli tření, jak vyplývá z provedené analýzy[8].

#### **2.1.2.2. Amontons Coulombův model**

Charles Coulomb ve svém modelu tření bral v úvahu také vliv drsnosti. Jeho představa styku dvou povrchů vypadala jako do sebe zaklesnuté štětiny dvou kartáčů. Stejně jako Amontons se domníval, že principem tření je pohyb nerovností jednoho tělesa po nerovnostech druhého. Coulomb si uvědomoval vliv přilnavosti na tření, avšak myslel si, že není velký. Zohlednil však molekulární působení a provedl ve formálním modelu Amontonse změnu v podobě přidání konstanty závislé na přilnavosti povrchu:

$$T = \mu P + C$$

kde: C - konstanta molekulárního působení.

Coulomb podobně jako Amontons nebral ohled na deformace nerovností. V jeho době nebyly zákony pro pružnou a plastickou deformaci dosud známy [28].

Model tření vypracovaný Coulombem podrobil kritice John Leslie. Podle jeho názoru by během pohybu nerovností jednoho tělesa po nerovnostech druhého, který prezentovali Amontons a Coulomb, při poklesu mělo docházet k ohýbání a deformaci povrchu. Leslie se domníval, že tření závisí na práci vykonané při deformaci povrchu, nesouhlasil však s názorem o podílu přilnavosti na tření.

Amontons-Coulombův model se nezabývá vlivem elementárních jevů na odpor kladený pohybu, všímá si však molekulárního působení a jeho vlivů na třecí sílu a doplňuje Amontonsův model o faktor spojený s těmito vlivy. Coulomb však nevysvětluje, co rozumí pod pojmem molekulárního působení. Díky zavedení veličiny spojené s molekulárním působením jeho model interpretuje ve srovnání s Amontonsovým modelem mnohem více jevů.

Amontons-Coulombův model je založen na dvou skupinách axiómů: na klasické mechanice v části týkající se mechanického působení a na kvantové mechanice v části týkající se molekulárního působení. Tento přístup však vytváří problémy při předvídání jevů, které vyplývají z protikladu mezi strukturální úrovní stavby hmoty materií ve skupinách axiómů klasické a kvantové mechaniky [3].

### 2.1.2.3. Ernst-Merchantův model

Ernst-Merchantův model bere v úvahu drsnost povrchu předmětů, v jejímž důsledku je skutečná plocha, kterou se povrchové vrstvy vzájemně stýkají, nevelká a je součtem miniaturních styčných ploch vrcholků nerovností. V tomto modelu je napětí na styčném povrchu podmíněno tvrdostí, protože autoři předpokládají, že vrcholky nerovností se pod zatížením vždy plasticky deformují. Během přitlačení normální silou dochází ke zničení oxidových vrstviček a odkryté čisté povrchy tvoří spojení v místech kontaktu. Formální zápis tohoto modelu vypadá následovně:

$$T = \frac{\tau}{HB} + tg \alpha$$



kde: HB - tvrdost,  $\tau$  - průměrná pevnost ve smyku pro celou skutečnou styčnou plochu [8].

Ernstův a Merchantův model byl založen na modelu plastického tělesa a předpokladu výskytu plastické deformace v každé oblasti styku. Tento model se používá u čistých materiálů, které byly zbaveny oxidových vrstviček. Na jeho základě je však obtížné předvídat výskyt některých elementárních jevů, proto také neplní prognostickou funkci, všímá si však významu plastických deformací v procesu tření [3].

#### 2.1.2.4. Bowdenův model

Při vypracovávání svého modelu Bowden předpokládal výskyt působení přilnavosti mezi stýkajícími se povrchy, zohlednil přítomnost pružných a plastických deformací v oblasti styku. Předpokládal, že tření doprovází nepřetržitý proces vzniku a přetrhávání adhezivních spojů. Z Bowdenových výzkumů plyne, že se hodnota třecí síly během procesu tření neustále mění [4].

Ve svém modelu Bowden předpokládal, že k přetrhání spojů dochází uvnitř spojení, a ne na původní hranici styku. Na základě těchto předpokladů Bowden vytvořil následující vzorec pro výpočet součinitele tření:

$$\mu = \frac{\tau}{R_c} + \frac{A_l}{A}$$

kde:  $R_c$  – mez plastifikace měkčího materiálu,  $A_l$  - plocha rýhy,  $A$  – skutečná styčná plocha.

Jak vyplývá z uvedených předpokladů, Bowdenův model zkoumá situace, při kterých dochází k rýhování materiálu, tedy případy spolupráce materiálů o různé tvrdosti. Je to zprůměrovaný model, který bere v úvahu průměrnou velikost rýhy, nepřihlíží k molekulárnímu působení povrchu ani k vlivu topografie povrchové vrstvy na výskyt jevů v oblasti tření [28].

### 2.1.2.5. Epifanovův model

Epifanovův model je považován za rozšíření Bowdenova modelu. Předpokládá podobně jako Bowden, že vnější tření kluzné součásti (kluzná součást na kotouči) se mění na vnitřní tření. Tento model přihlíží k vlivu smykové plochy a normální síly na velikost třecí síly. Formální zápis tohoto modelu vypadá následovně:

$$T = \tau_0 A_s + kP$$

kde:  $\tau_0$  – pevnost ve smyku při normálním napětí rovném nule,  $A_s$  – smyková plocha,  $k$  – gradient změn smykových napětí se změnou normálních napětí.

V Epifanovově modelu se tření vztahuje k makroskopické úrovni, nepřihlíží se k molekulárnímu působení ani k jevům s ním spojeným. Autoři vysvětlují odpor kladený pohybu jako důsledek vzniku deformací při vzájemném přemísťování těles, která se stýkají. Úplné pominutí molekulárního působení omezuje použitelnost těchto modelů pouze na řešení jednotlivých případů. Prognostické možnosti těchto modelů jsou neuspokojivé [8].

### 2.1.2.6. Srážkový model

Rakowski představil model, jehož cílem byla identifikace mechanismu kinetického procesu vnějšího tření. V tomto modelu je pro danou dvojici těles za daných podmínek tření kritériem druhu interakce jednotlivých mikronerovností povrchu náhodná hodnota, zvaná hloubkou interakce. Model bere v úvahu kvazidynamické působení dvou těles, mezi nimiž tření probíhá, ke kterému dochází v mikrooblastech jejich styku. Součinitel tření je vyjádřen v souladu s Amontonsovým zákonem jako součin třecí síly a přítláčné síly, avšak vzhledem ke změně hodnoty tohoto součinu se hodnota součinitele tření mění v širokém rozsahu. Autor se domnívá, že ztotožňování hodnoty součinitele tření, stanovené pro interakci dvou jednotlivých mikronerovností povrchu těles, se součinitelem tření (globálním) pro tato tělesa je v daných podmínkách neodůvodněné [3].

Popisovaný model je atributivním modelem, který spojuje vnější kinetické tření s odporem kladeným pohybu. Autor se vyhýbá zprůměrování zavedením náhodné

stereometrické struktury povrchu, definuje různé druhy interakcí pro různé oblasti zóny tření. Tento model se používá pro případy kinetického tření při kvazidynamickém působení dvou těles, mezi nimiž tření probíhá [3].

### 2.1.3. Genetické modely

Spolu s rozvojem teoretické a experimentální základny byly řešeny podrobnější problémy, týkající se modelování jevů, jejichž vliv na proces tření byl uznán za významný. Tak vznikaly genetické modely, které spojovaly příčiny vzniku odporů proti pohybu během tření s výskytem určitých jevů v oblasti styku těles. Můžeme zde zmínit alespoň modelování spojení vznikajících během tření spolupracujících součástí (také modelování v mikroměřítku) [2].

#### 2.1.3.1. Tomlinsonův model

Tomlinsonův model byl vytvořen na základě předpokladu existence molekulárních přitažlivých a odpuzivých sil jako funkce vzdálenosti mezi částicemi. Tomlinson předpokládal, že normální síla je vyvažována silami molekulárního odpuzování, proto se domníval, že síly molekulární přitažlivosti jsou zanedbatelně malé ve srovnání s normální silou. Ve svých úvahách přihlížel také k energii potřebné k roztržení molekul, nezohlednil však vazby mezi atomy vnitřní vrstvy a vad v krystalické síti. Na základě provedené analýzy Tomlinson definoval vzorec pro součinitel tření:

$$\mu = \frac{qnE}{lP}$$

kde: E - průměrná energie potřebná k roztržení molekul, q - určitá statistická konstanta, l – vzdálenost mezi sousedními atomy, n – celkový počet odpuzujících se molekul.

Tomlinsonova teorie je založena na klasické teorii stavby chemických sloučenin, nepochybnou zásluhou jejího autora je pozornost věnovaná na molekulárnímu působení povrchu během tření [8].

Můžeme najít genetické vlastnosti tohoto modelu, protože výrazně poukazuje na souvislosti odporu kladeného pohybu a disipace energie s jevy spojenými s působením atomů v oblasti styku. Praktický význam Tomlinsonova modelu není velký, snad jen vývoj modelu na základě axiomatiky kvantové mechaniky by dovolil značně posílit jeho použitelnost a interpretační hodnotu [2].

### 2.1.3.2. Děrjaginův model

Děrjagin považoval za hlavní příčinu tření molekulární drsnost těles, mezi nimiž tření probíhá. Předpokládal, že působení sil v třecí dvojici jsou součtem dvou složek, z nichž jedna pochází od vnějších sil a druhá zohledňuje molekulární působení. V souladu s tímto předpokladem můžeme třecí sílu vyjádřit vzorcem:

$$T = \mu (P + A_r \gamma) [28]$$

kde:  $A_r$ - skutečná styčná plocha,  $\gamma$ - práce přilnavosti na jednotku skutečné styčné plochy.

Pod vlivem zatížení vzniká během mikrostyku čistých povrchů mezi stýkajícími se povrchy vazba. Děrjagin ve svých úvahách o pružném styku mezi výstupkem nerovnosti o poloměru  $r$  a pevnou plochou předpokládal, že přitahující síla pochází hlavně z vnější zátěže. Deformace v jeho modelu byla definována pomocí Hertzových vzorců, autor předpokládal, že styčná plocha nezávisí na povrchových silách. Vycházeje z těchto předpokladů B. Děrjagin definoval vzorec pro výpočet rozdělovací síly vzniklého spojení jako:

$$P_c = 2 \Pi r \gamma [4]$$

### 2.1.3.3. Johnsonův model

Johnson ve svém modelu zohlednil povrchové síly a dokázal, že za takové situace je styčná plocha větší než by to vyplývalo z Hertzových vzorců. Podle Johnsonova modelu je třeba sílu potřebnou k rozdělení plochy vypočítat podle vzorce:

$$P_c = \frac{3}{2} \pi r \gamma$$

Modely Děrjagina a Johnsona se vzájemně poněkud doplňují, protože se vztahují na různé hodnoty parametru  $\Phi$ , který závisí na materiálových vlastnostech, poloměru  $r$  a adhezní práci připadající na jednotku povrchu. Podle něj se stanovuje použitelnost analyzovaných modelů: Děrjaginův model se používá pro  $\Phi < 0.3$ , Johnsonův model můžeme použít pro hodnotu  $\Phi > 3$ . Děrjaginův model je použitelný pro případy, kde je hodnota poloměru  $r$  a adhezní práce  $\gamma$  malá a pro velké hodnoty redukovaného Youngova modulu. Jak vyplývá z provedené analýzy výzkumů prováděných s využitím těchto modelů, rozsah jejich využití je omezený a závěry vyvozené na jejich základě nenacházejí potvrzení např. při výzkumu klidového tření [3].

### 2.1.4. Mechanicko molekulární model Kragielského

Podle Kragielského je nutno uznat dvojakost charakteru tření. Kragielski tvrdí, že třecí síla pochází z molekulárního působení mezi dotýkajícími se materiály, ale mají na ni také vliv mechanická poškození dotýkajících se povrchů.

Z popisného modelu Kragielského vychází formální zápis, který definuje součinitel tření jako:

$$\mu = \frac{\alpha A}{P} + \beta$$

kde:  $A$  – styčná plocha,  $\alpha$  a  $\beta$  parametry závislé na mechanických a molekulárních vlastnostech povrchu. [2].

Model Kragielského byl podroben kritice Dubininem, který mimo jiné dokazuje, že uvažování v souladu s formálním modelem Kragielského může přivést k závěru o absenci klidového tření.

Na základě modelu Kragielského můžeme vysvětlit mnoho jevů, které se objevují během tření, avšak při použití v různých podmínkách tření není jeho prognostická hodnota velká. V případě silných mechanických vlivů (rozebíraných v makroskopickém měřítku) lze předpověď jevů vznikajících při tření s využitím modelu Kragielského uznat za oprávněnou. Na nižších hierarchických úrovních je prognostická hodnota modelu pochybná [8].

### **2.1.5. Mechanický Suhův model**

Kim a Suh se domnívají, že přilnavost není hlavní příčinou tření. Suh tvrdí, že u klouzajících kovových materiálů třecí síla pochází především ze vzniku rýh, deformace mikronerovností a přilnavosti. V souladu s experimentálním potvrzením převládají v obvykle vznikajících stavech tření mechanické složky tření, zvláště vznik rýh v materiálu způsobený částicemi opotřebení. Autor tvrdí, že po odstranění mechanického působení se součinitel tření podstatně zmenší. Provedené výzkumy potvrdily významný pokles hodnoty součinitele tření pro tzv. zvlněný povrch, který zaručuje zmenšení mechanického působení. V souladu s názory autorů, nižší součinitel tření pozorovaný u zvlněného povrchu (z mikrorýhami), ve srovnání se součinitelem tření pro nezvlněný povrch, vyplývá z vyloučení částeczek opotřebení jejich „chytáním“ do rýh. Tato pozorování jsou v rozporu s adhezní teorií, podle které součinitel tření pro stejné materiály musí být velký. V souladu se svými úvahami autoři došli k závěru, že mechanické působení má větší význam adhezní působení v situaci, při které dochází k nepřetržité produkci částeczek opotřebení během kluzného kontaktu [3].

Mechanický Suhův model patří mezi genetické modely a odpor kladený pohybu vysvětluje mechanickým působením. Toto vysvětlení se týká takových situací během tření, při kterých dochází k produkci částeczek opotřebení. Jeho využití je omezeno na situace během tření, při kterých dochází k intenzivní produkci částeczek opotřebení. Na základě tohoto kritéria je obtížné stanovit podmínky oprávněnosti použití tohoto modelu[8].

## **2.2. Procesy opotřebení**

Opotřebením se rozumí proces změn v povrchové vrstvě pevného tělesa, jehož důsledkem je opotřebení, které je možno měřit objemově, lineárně nebo váhově. Z obecného hlediska můžeme procesy opotřebení klasifikovat následovně:

- z hlediska příčiny: tribologické a netribologické
- z hlediska průběhu: stabilizované a nestabilizované
- z hlediska důsledků: normální a havarijní (abnormální) [17].

### **2.2.1. Tribologické opotřebení**

Tribologické opotřebení je způsobeno třením, má mechanický, fyzikální a chemický charakter. Dochází k němu vždy při suchém a smíšeném tření:

- mechanické procesy opotřebení: jde o oddělování částeczek ze spolupracujících povrchů v procesu mikroobrábění výčnělky mikronerovností nebo volnými drsnými částicemi
- fyzikální procesy opotřebení: souvisejí s přilnavostí těles, mezi nimiž tření probíhá, (přilnutí, srůstání, difuze) a způsobují opotřebení oddělováním částeczek z jednoho tělesa a jejich nanášením na spolupracující těleso nebo mikroobráběním druhého povrchu vytvořenými nárosty
- chemické procesy opotřebení: probíhají mezi materiály, mezi nimiž tření probíhá, a prostředím, ve kterém celý tribologický proces probíhá [17].

### **2.2.2. Oxidační opotřebení**

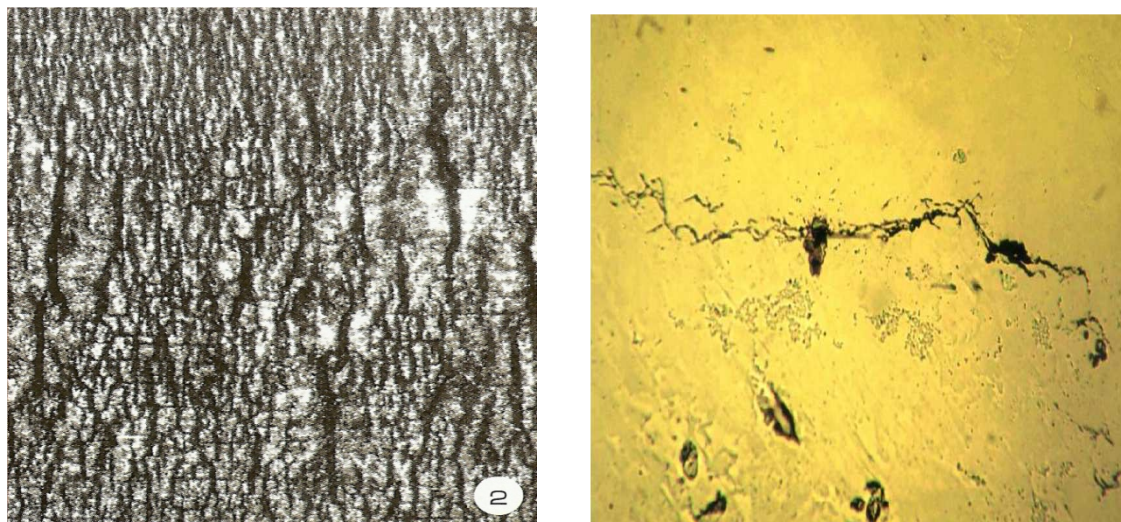
Chemická a mechanická forma opotřebení, jehož proces spočívá v postupném odstraňování (ničení) a obnově oxidačních vrstviček na povrchu kovů. Patří mezi normální typy opotřebení. Dochází k němu nejčastěji během tření kovů a jejich slitin, které se liší svými chemickými a mechanickými vlastnostmi, mají heterogenní strukturu, a slitin se zvýšenou tvrdostí a hranicí plasticity. Produkty opotřebení mají formu tenkých šupin s ostrými hranami (křehké praskání oxidů). Opotřebení tohoto

druhu najdeme např. v soustavách: válec – píst – pístní kroužky v dobře promazaných spalovacích pístových motorech. Oxidační opotřebení je intenzivnější, když je rychlost ničení oxidů vyšší než rychlost jejich vzniku [5].

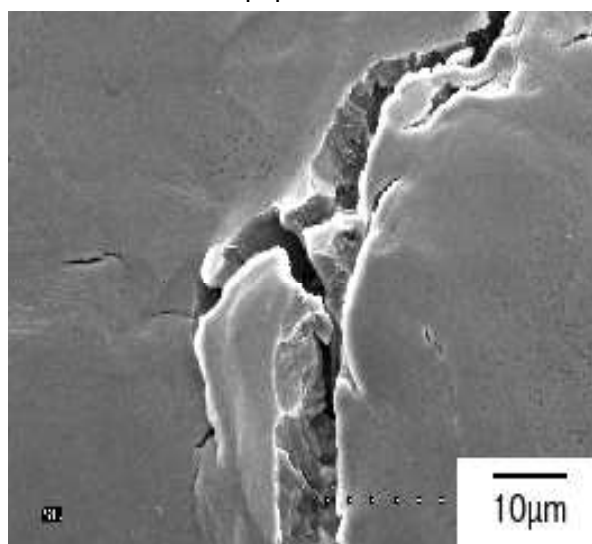
### **2.2.3. Vodíkové opotřebení**

Proces spojený s tímto druhem opotřebení spočívá v ničení povrchové vrstvy v důsledku adsorpce vodíku na povrchu ocele a litiny a jeho difuze do hloubky materiálu, což způsobuje křehké praskání v mikroobjemech povrchové vrstvy a její ničení vlivem třecích sil. Rozlišujeme dva základní druhy vodíkového opotřebení ocele a litiny: disperzní a vydrolování. Disperzní spočívá v povolení struktury podpovrchových vrstev ocele a litiny a oddělení drobných částic následkem působení třecích sil. K vodíkovému vydrolování dochází tehdy, když je podpovrchová vrstva nasycena vodíkem a současně dojde k deformaci povrchové vrstvy následkem působení třecích sil. Vodík zaplní prázdná místa v deformované struktuře této vrstvy a při zátěži, protože nemá kam uniknout, způsobuje napětí, které vede k tvorbě štěrbin a následnému vydrolování materiálu z podpovrchové vrstvy. Vodíkové opotřebení bylo pozorováno na povrchu rotorů a rozvodových kotoučů naftových čerpadel, v brzdových soustavách (přenos litiny na třecí obložení z umělých hmot). Vodíkové opotřebení se objevuje také při valivém tření. Abychom zabránili procesům vodíkového opotřebení, je nutno při výběru materiálů pro třecí uzel přihlížet k jejich sklonu k hydrataci. Je třeba se vyhnout spojení ocele a litiny s polymery. Snížit možnost pronikání vodíku do materiálu přidáním chromu, titanu a vanadu [6,14].





Obr.1. Forma vodíkového opotřebení ocele spolupracující s textolitovými součástkami [6].



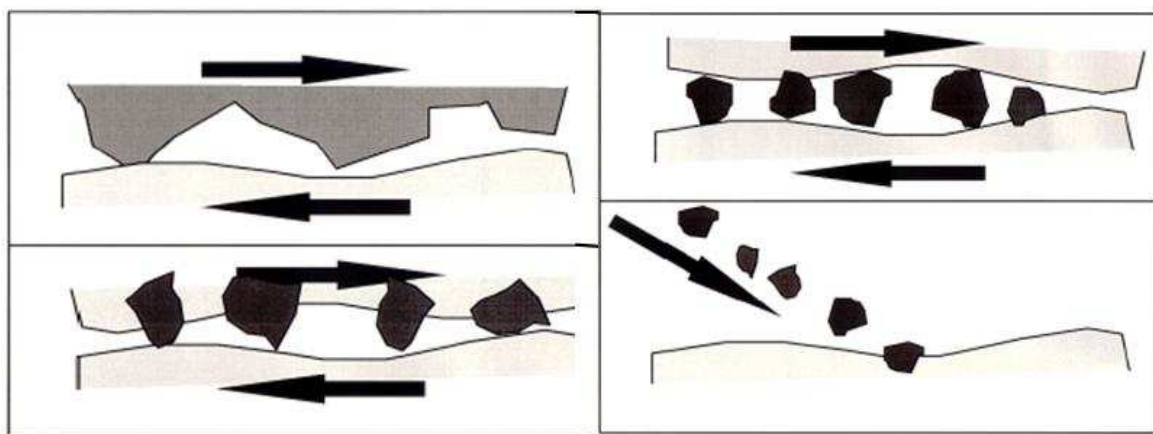
Obr.2. Zvětšení jediné zlomeniny [14].

#### 2.2.4. Opotřebení třením

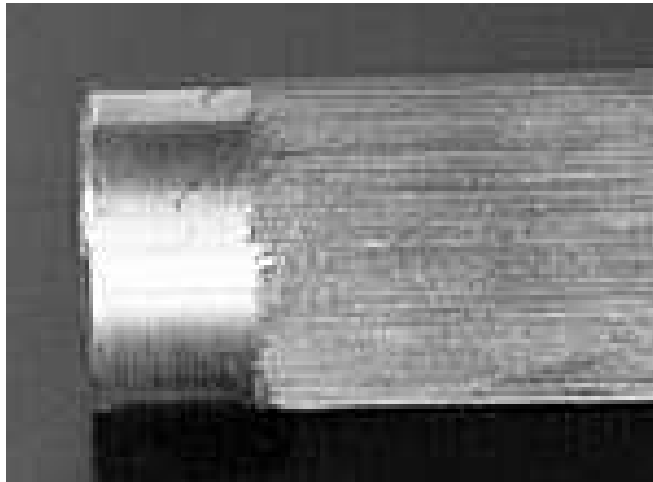
Tento druh opotřebení můžeme zařadit mezi chemicko-mechanické nebo mechanické procesy. Hranicí těchto druhů opotřebení je poměr tvrdosti opotřebovaného kovu ( $H_m$ ) a tvrdosti brusného materiálu ( $H_s$ ). Pokud je  $H_m / H_s > 0,6$ , vzniká mírnější forma tření chemicko-mechanického typu, pokud je  $H_m / H_s < 0,6$ , dochází k mikroobrábění, a tedy k poškozování povrchu třením. Obrušování je nejčastějším

druhem opotřebení. Vyskytuje se všude tam, kde se volné brusivo přemisťuje vůči povrchu pevného tělesa [2,4].

Základními procesy, které probíhají během opotřebení třením jsou: vznik rýh a mikroobrábění. Rozdíl mezi těmito mikroprocesy spočívá ve tvaru brousícího zrna nebo výčnělku nerovnosti, a zvláště na hodnotě úhlu odchodu třísek. Při velkých úhlech odchodu třísek dochází k mikroobrábění, při malých úhlech ke vzniku rýh. Tyto dva procesy obvykle probíhají najednou a převažuje jeden z nich, což má vliv na intenzitu opotřebení třením. Vytvářet rýhy nebo obrábět povrch mohou: volné brusivo, brusivo utužené v měkčím materiálu a výčnělky nerovností povrch, a také brusivo obsažené v kapalinách. Intenzita opotřebování závisí na vlastnostech brusiva (tvrdost, velikost zrn, jejich tvar) a na vlastnostech brusného materiálu (tvrdost a modul pružnosti), a také na podmínkách, za kterých k němu dochází (zátěž, relativní rychlost, teplota, okolí). Nadměrnému opotřebení třením bráníme volbou vhodných tvrdých materiálů (např. kompozity s karbidy wolframu, martenzitické ocele, legované ocele kobaltové a niklové, perlitické, manganové), účinným utěsněním mazacích drážek, přiměřeným mazáním systému a filtrováním pracovních kapalin (např. mazací oleje, vzduch ve spalinovém motoru, vzduch přiváděný do kompresoru) [4,5,17,18].



Obr.3. Schéma vzniku opotřebení třením [18]



Obr.4. Forma opotřebení třením [12].

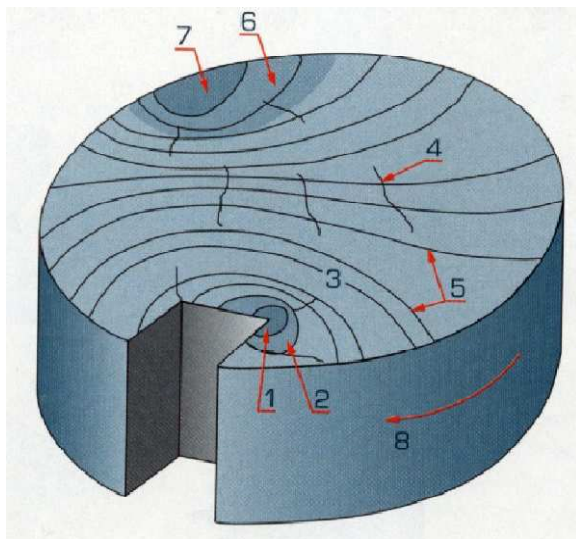
### 2.2.5. Únavové opotřebení

Cyklické zatížení součástí vystavených stálému tření způsobuje jejich únavu a nakonec opotřebení. Typická soustava, ve které probíhají únavové procesy povrchových vrstev je soustava valivého tření. V této soustavě se vyskytují cyklická zařízení styčných ploch. Jde o koncentrovaný styk. Následkem mnohokrát opakovaných styků se v podpovrchové vrstvě začínají objevovat mikropraskliny, které po rozšíření k povrchu způsobují jeho úbytky. Rozlišujeme dva druhy únavového opotřebení:

- opotřebení vydrolováním (pitting): dochází k němu při mazaném kontaktu během valivého pohybu nebo valivého pohybu se smykem, skládá se ze tří fází (únavové praskání povrchové vrstvy a tvorba mikroštěrbín – rozštěpovací působení oleje – vytrhávání poškozených součástí štěrbin z povrchové vrstvy následkem adsorpce oleje a roztažného napětí v místě styku) např. valivá ložiska, ozubené převody, křivkové pohony.
- opotřebení oloupáváním (spalling): dochází k němu při suchém kontaktu během valivého pohybu nebo valivého pohybu se smykem, a také při málo mazaném kontaktu (např. v málo mazaných valivých ložiskách a ozubených převodech, v hutních válcích, v soustavách kolo – kolejnice)

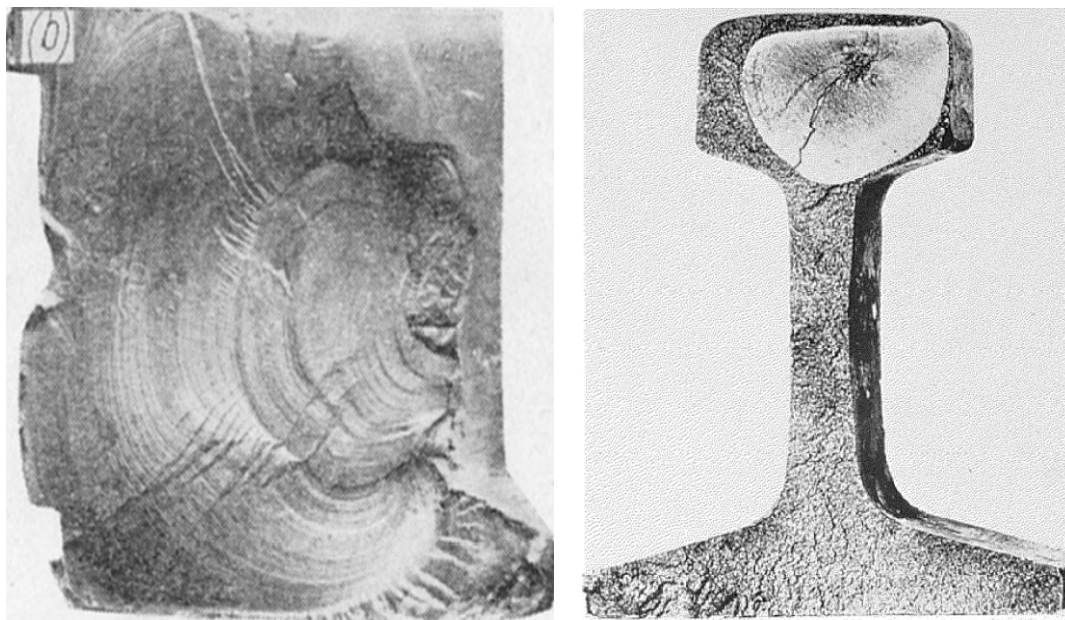
K únavovému opotřebení počítáme také únavové praskání a vydrolování vrstev ložiskových slitin a praskání povrchových vrstev v důsledku tepelné únavy. Takovému

opotřebení podléhají sloučeniny cínu a olova (bability), zvláště u velkých průměrů odlitku [21].



- 1- ohnisko,
- 2- oblast kolem ohniska,
- 3- přesmyky primární,
- 4- přesmyky sekundární,
- 5- únavové linie,
- 6- přechodné pásmo,
- 7- zbytkové pásmo,
- 8- směr otáčení hřídele,

Obr.5. Schéma vlastností povrchu únavových zlomů [25].

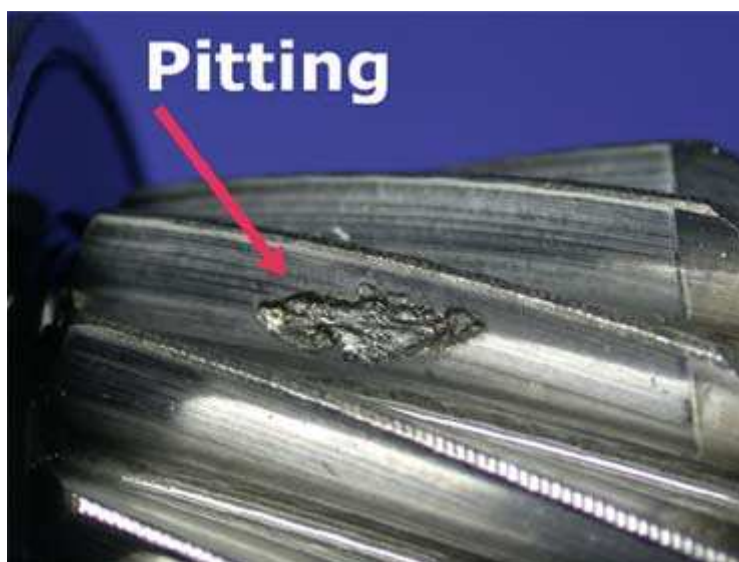


Obr.6. Únavový lom ráfku pojezdového kola lokomotivy (vlevo)[11], kolejnička-únavový lom (vpravo)[21].



### 2.2.5.1. Pitting

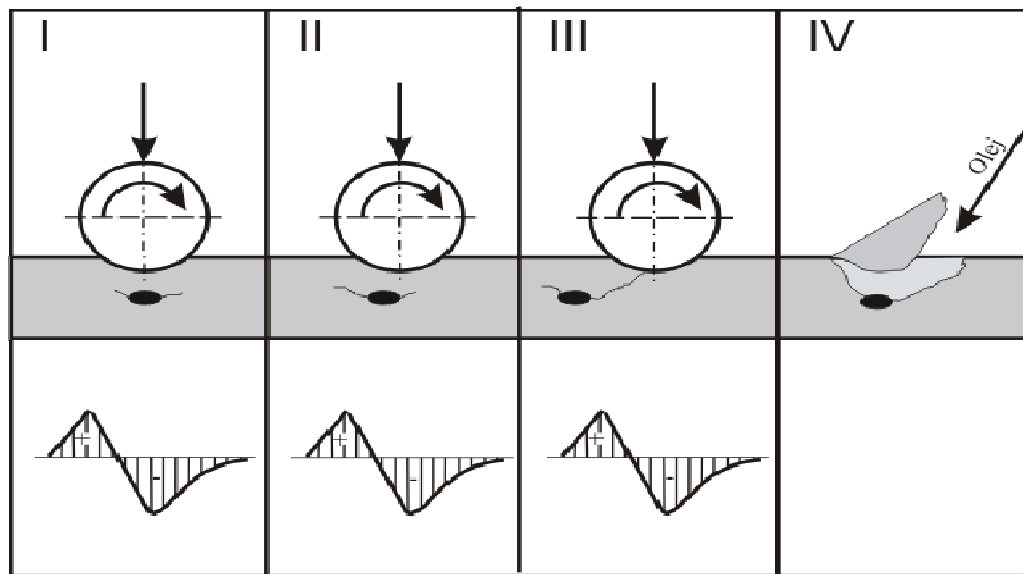
Jde o druh opotřebení, ke kterému dochází vydrolováním. Vyskytuje se v mazaných kontaktech, během valivého pohybu nebo valivého pohybu se smykem. Jinou příčinou tohoto druhu opotřebení může být únava povrchové vrstvy, způsobená cyklickým zatížením kontaktu. Pittingové opotřebení začíná vznikem křehkého prasknutí v oblasti maximálního zatížení materiálu vnějším napětím. Doba mezi vznikem prasknutí a jeho objevením se na povrchu je poměrně dlouhá. V okamžiku, kdy se prasknutí objeví na povrchu, do štěrbin je vtlačena mazací látka, která se pak účastní konečného oddělování částecek materiálu od povrchu [1,5].



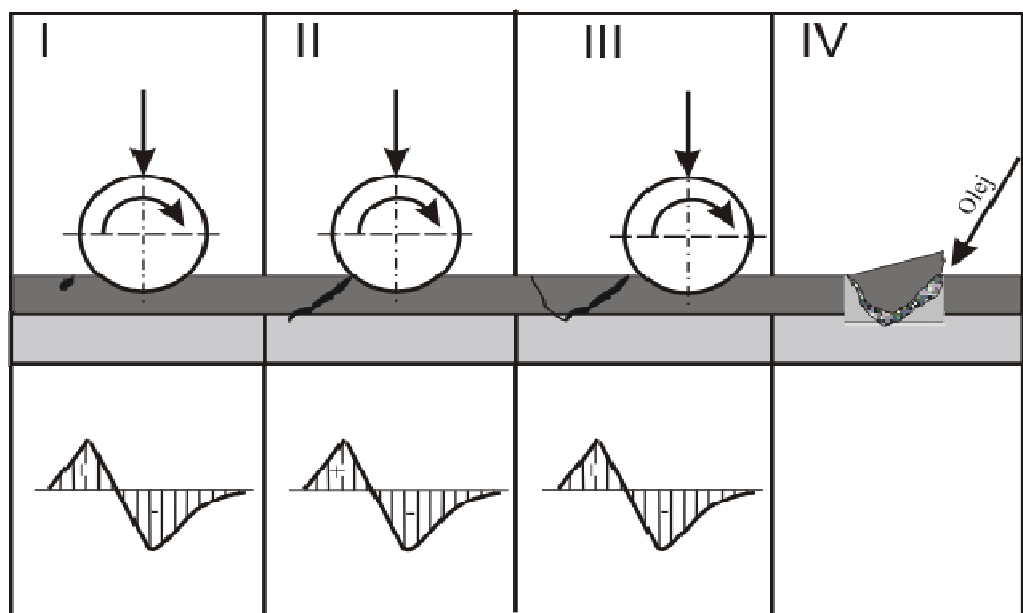
Obr.7. Fotografie důsledků a forem opotřebení pittingem [7].

Můžeme rozlišit dva rozdílné mechanismy vzniku stykové únavy:

- normální – dlouhodobý proces, který začíná v místě, kde dochází k největšímu namáhání materiálu, tedy v Běljajevově bodě
  - katastrofální – krátkodobý proces, který začíná na povrchu nebo v jeho blízkosti.
- [1,2].



Obr.8. Pitting – schéma vzniku zárodku a šíření praskliny v povrchové vrstvě u normálního typu (dlouhodobé) stykové únavy [1,2].

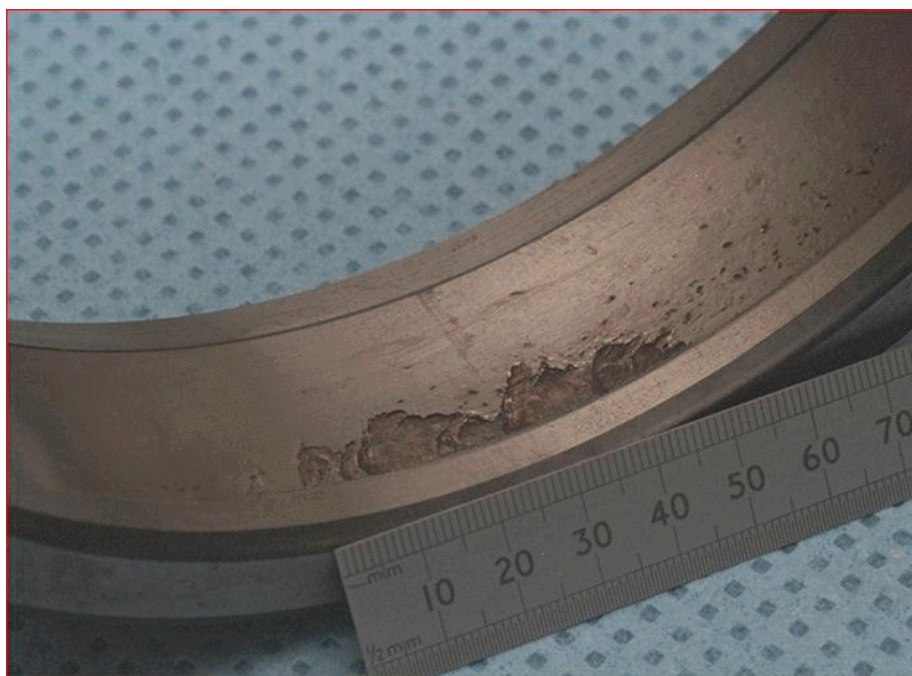


Obr.9. Pitting – schéma vzniku zárodku a šíření praskliny v povrchové vrstvě u katastrofálního typu stykové únavy [1,2].

Příčinou katastrofální destrukce třecích dvojic jsou četné nedokonalosti ve struktuře povrchové vrstvy, mezi které patří vylučování cementitu na hranicích zrn, příliš silné a porézní zóny nitridových sloučenin a vylučování nitridů  $\gamma'$  na hranicích zrn v nitridových vrstevkách a mnoho jiných strukturálních činitelů. Na vzniku zárodku křehkého praskání materiálu blízko povrchu se mohou podílet také vlastní napětí, která se vždy vyskytují ve zpevněných povrchových vrstevkách. Na katastrofální průběh pittingu má vliv také okamžitá účast mazací látky a výskyt tahového napětí v šíření únavového prasknutí [1, 2].

### 2.2.5.2. Spalling

Opotřebení spallingem vzniká při nemazaném kontaktu nebo při použití malého množství mazací látky během valivého pohybu se smykem. Důsledkem tohoto druhu opotřebení je odlupování částeczek materiálu v podobě šupin, které způsobuje rozsáhlé, avšak mělké úbytky materiálu v povrchové vrstvě [5].



Obr.10. Drážka ložiska opotřebovaná spallingem [5].

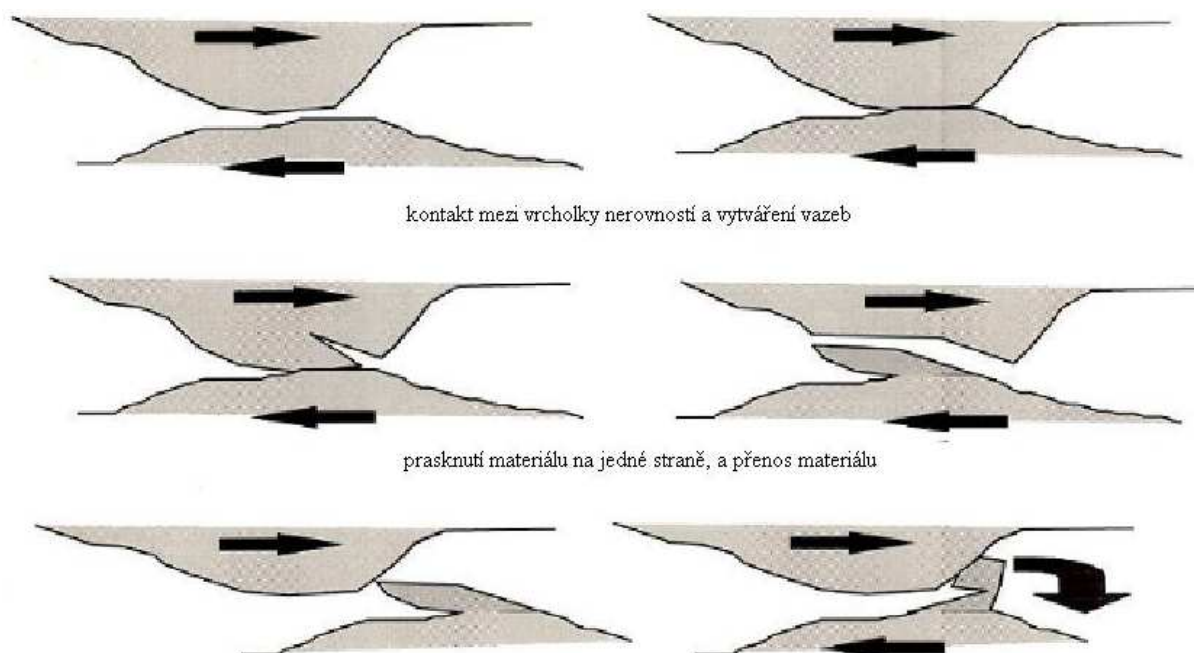
Hlavní podmínkou vzniku opotřebení spallingem je růst napětí uvnitř povrchové vrstvy v důsledku přímého kontaktu třecích prvků. Růst napětí v povrchové vrstvě napomáhá šíření mikroprasklin, které se dostanou až na povrch a způsobují ztrátu spojitosti částeczek kovu s podkladem. Jednou z příčin opotřebení způsobeného spallingem je vytvrzení materiálu v povrchové vrstvě vyvolané plastickými deformacemi. Porovnáme-li spalling s procesem opotřebení během pittingu, k opotřebení odlupováním dochází během 2-3 krát kratší doby, a úbytky materiálu jsou také mnohem větší [6].

### **2.2.6. Adhezivní opotřebení**

Jedná se o destrukci povrchové vrstvy spolupracujících částí následkem vzniku a destrukce adhezivních spojení, mikrosvarů a mikrospojení, které vznikají mezi vrcholky nerovností spolupracujících povrchů. Dochází k němu prakticky při každé spolupráci prvků v procesu tření, s výjimkou případů, kdy jsou úplně odděleny vrstvou mazacího filmu.

Rozlišujeme adhezivní opotřebení (přilnutí) typu I (za studena), při kterém dochází ke vzniku adhezivních spojů mezi vrcholky protilehlých povrchů a jejich okamžité destrukci. K adhezivnímu opotřebení (přilnutí) typu II (za horka) dochází v podmínkách velkých rychlostí a zátěže a také v případě špatného chlazení třecích prvků, zejména pokud pracují ve zvýšené teplotě. Značný nárůst teploty v povrchové vrstvě kovu uvádí vrcholky nerovností vzájemně na sebe působících povrchů uvedených do těstovitého nebo nataveného stavu a způsobuje jejich spájení nebo svaření. K adhezivnímu opotřebení může docházet v pomaloběžných kluzných ložiskách, kloubových spojeních, a také v nedostatečně mazaných šnekových převodech a silně zatížených ozubených převodech. Rychlý průběh adhezivního opotřebení vede často k zadření stroje, proto jde o nepřipustný abnormální druh opotřebení [16].





Obr.11. Schéma vzniku adhezivního přilnutí [18].

### III. Praktická část

#### 3.1. Příklady konstrukcí lineárních tribometrů

##### 3.1.1. Lineární tribometr T17

Jedním z konstrukčních řešení lineárního tribometru je zařízení T17, které bylo vyrobeno v polském Institutu technologie provozu při Státním výzkumném ústavu v Radomi („Instytut Technologii Eksploatacji, Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu“)



Obr.12. Celkový pohled na zařízení pro zkoumání tření při vratném pohybu [20]

Tribologická měřicí sestava slouží ke zkoumání materiálů, které spolupracují prostřednictvím skluzu, především se zohledněním materiálů určených k výrobě částí kloubních protéz, např. polymerů. Hodnoceny jsou vlastnosti odolnosti proti stěru a proti opotřebení měřených materiálů, určené v podmínkách, které vyplývají z fyziologických pohybů lidských kloubů.

Měření může být provedeno podle normy ASTM F 732-82.

#### **Technická charakteristika:**

Tribologická měřicí sestava T-17 je složena z následujících částí:

- měřicí zařízení T-17 s převodníky měřených veličin,
- řídící prvek BT-06,
- datový měřicí zesilovač,
- počítač s instalovaným speciálním programem pro řízení a měření.

V průběhu zkoumání jsou měřeny následující hodnoty:

- třecí síla,
- lineární opotřebení čepu,
- teplota čepu,
- počet cyklů (třecí dráha).

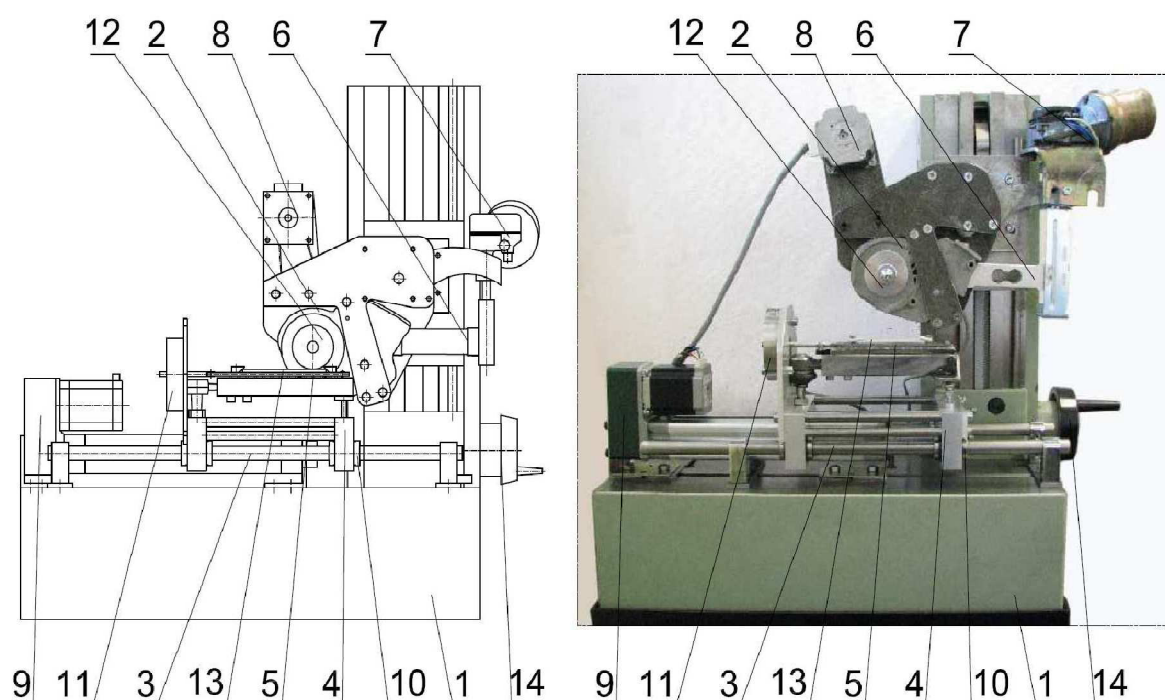
Průběžně měřené hodnoty jsou zobrazovány na obrazovce monitoru a následně archivovány na počítačovém disku. Po měření je možné vytisknout zprávu s grafickým zobrazením změn velikosti jednotlivých hodnot v závislosti na časové funkci [20].

#### **Technické parametry:**

- druh vratného pohybu
- geometrie dotyku dotyk rozložený: plocha-plocha
- amplituda 0.5 - 12.5 mm
- frekvence pohybu 0.5 - 9.5 cyklů/s
- zatížení 10 - 245 N
- mazací prostředek krevní sérum z volí krve
- rozměry:
  - zařízení T-17 600 x 430 x 200 mm
  - řídící prvek BT-06 430 x 240 x 350 mm
- hmotnost:
  - zařízení T-17 30 kg
  - řídící prvek BT-06 11 kg
- napájení 220 V / 50 Hz

### 3.1.2. Stanoviště pro tribologická měření

Toto stanoviště bylo připraveno a zhotoveno v Institutu konstrukce a provozu strojů na Vratislavské polytechnice („Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej“). Stanoviště je tvořeno dvěma nezávislými soustrojími. První soustrojí má za úkol uvádět válcový vzorek do rotačního pohybu a přitlačovat jej k povrchu protilehlého zkušební vzorku s odpovídající, zadanou tlakovou silou  $F_n$ . Druhé soustrojí odpovídá za lineární pohyb protilehlého zkušební vzorku a za měření třecí síly  $F_t$ , která vystupuje mezi spolupracujícími materiály.



Obr.13. Stanoviště pro tribologická měření při cyklickém točivě-kluzném pohybu, 1- základna, 2- výkyvné rameno, 3- vodící plochy vozíku, 4- dolní vozík, 5- horní vozík, 6- čidlo tlakové síly, 7- zatěžovací soustrojí, 8- krokový motor, 9- elektrický servomotor, 10- uložení dolního vozíku v ložisku, 11- čidlo třecí síly, 12- zkušební vzorek, 13- protilehlý zkušební vzorek, 14- klika. [22]

Uložení válcového zkušební vzorku (12) je provedeno ve výkyvném ramenu (2), které tvoří páku. Na jedné straně ramena je umístěnou zatěžovací soustrojí (7) a na druhé pak v ložisku osazená hřídel zkušební vzorku. Zatěžovací soustrojí (7)

způsobuje přitlačení zkušební vzorku přes čidlo tlakové síly (6) k povrchu protilehlého zkušební vzorku (13). Krokový motor (8) pohání zkušební vzorek (12) pomocí převodu ozubeným pásem. Motor není uchycen na výkyvném ramenu, ale na základně prvního soustrojí. Toto řešení zmenšuje setrvační moment výkyvného ramena, což má pozitivní vliv na možnost provádění rychlých změn zatěžovací síly. Zatěžovací soustrojí (7) je zhotoveno s využitím šroubového převodu. Matice převodu je připevněna k pružině a ta pak dále k čidlu tlakové síly (6). Otáčka šroubu způsobuje natažení nebo uvolnění pružiny, což má za důsledek zvětšení nebo zmenšení zatěžovací síly.

Druhé soustrojí je tvořeno dvěma vozíky (4, 5), které jsou umístěny v ložiscích tak, aby se mohly pohybovat ve stejném směru. Soustrojí je poháněno elektrickým servomotorem (9), který se skládá z krokového motoru a šroubového převodu. Servomotor pohybuje během vysouvání dolním vozíkem (4), na kterém se nachází horní vozík (5). Větší platforma (dolní vozík 4) se pohybuje po dvou v ložiscích umístěných vodicích lištách (3). Rozsah pohybu horního vozíku (5) v poměru k dolnímu vozíku je roven hodnotě prohybu čidla třecí síly (6) vlivem třecí síly  $F_t$ .

V obou soustrojích jsou k pohonu využity bipolární, dvoufázové krokové motory. Konstrukční vlastnosti krokových motorů umožňují velmi přesné určování polohy úhlové pozice hřídele. Použití doplňujících převodů tuto přesnost ještě zvyšuje. Řízením frekvence řídicích impulsů je možné měnit otáčivou rychlost s prováděním kontroly uskutečněného posunu. Díky použití tohoto druhu pohonu je možno zadávat v závislosti na časové funkci libovolné posuny zkušební vzorku a protilehlého zkušební vzorku.

V průběhu vratného pohybu se ve vratných bodech vyskytuje značné zrychlení, je to spojeno s výskytem velkých setrvačných sil, které mohou rušit měřené hodnoty třecí síly. Tento problém byl vyřešen použitím soustavy dvojitého vozíku. Navíc byla minimalizována hmotnost horního vozíku (připevněného k čidlu) pomocí toho, že jsou v jeho konstrukci využity lehké slitiny (slitiny hliníku a titanu), což celkově omezilo nežádoucí efekt.

V poháněcím ústrojí stanoviště je použita kardanová hřídel. Tato hřídel umožňuje přenášet točivý moment při současné práci s posunutými rotačními osami. Tento posun je nevelký a vyplývá především z ohybu protilehlého zkušební vzorku a také zkušební vzorku vlivem tlačné síly  $F_n$ [22].

### 3.1.3. Tribometr TPZ

Ještě jiným příkladem zařízení, které zkoumá tření při vratném pohybu, je tribometr TPZ



Obr.14. Celkový pohled na zařízení TPZ [27].

Toto zařízení má splňovat následující předpoklady:

- stanoviště má sloužit ke zkoumání skluzového tření při vratném přímočarém pohybu,
- dotyk zkušebních vzorků je plochý rozložený nebo koncentrovaný přímkový (válec / plocha), nebo bodový (koule / plocha, protínající se válce, a především kužel s malým poloměrem křivosti vrcholku / plocha),
- dotyk je technicky suchý nebo mazaný,
- v případě rozloženého dotyku je malý (cca 10 mm<sup>2</sup>) nominální dotykový povrch,
- regulovaná úroveň vstupních veličin – rychlosti skluzu, zatížení a teploty,
- rychlost skluzu stálá téměř po celé délce třecí dráhy,
- proměnlivá frekvence vlastních vibrací soustrojí, které vede pasivní zkušební vzorek, a soustrojí, které působí zatížení,
- průběžné měření sumárního lineárního opotřebení zkušebních vzorků,
- počítačové řízení stanoviště, registrace úrovně vstupních veličin, výsledků měření a jejich akvizice.

S ohledem na charakteristiku krokových motorů a použité řídicí soustrojí bylo možné z měřicího soustrojí eliminovat čidla posunu a rychlosti. Zadávání odpovídající úhlové rychlosti  $\omega$  a také rychlosti posunu  $v_p$  je realizováno prostřednictvím konfigurace mikrokontroléru modulujícího řídicí prvek krokového motoru. Frekvence časového měřiče mikrokontroléru obnášela 12 MHz, což dává při maximálním počtu kroků a při rychlosti posunu  $v_p = 36$  mm/s přesnost větší než 1  $\mu$ m/s].

K měření třecích sil  $F_t$  a tlaku  $F_n$  byla použita hotová tensometrická čidla pro měření sil. Čidlo třecí síly pracuje během stlačování a roztahování, zatímco čidlo tlakové síly pracuje během ohybu. Měřidla jsou třídy = 0,1. Měřicí rozsahy třecích sil  $F_t$  a tlakové síly  $F_n$  činily 1000 N.

Na měřené dráze byl využit tensometrický můstek, z něhož je zesílený napěťový signál přenášen na řídicí a měřicí kartu. Karta je propojena s počítačem třídy PC pomocí



interface USB. Hodnoty naměřených sil v průběhu celého měření jsou zapisovány v podobě souboru. Registrace je provedena s kmitočtem zkoušení  $f_p = 50 \text{ Hz}$ .

Tribometr TPZ – technické parametry

Maximální skok vratného pohybu do 40 mm

Průměrná rychlost klouzání  $0,01 \div 0,5 \text{ m/s}$

Maximální síla tlaku zkušebních vzorků do 1000 N

## **3.2. Konstrukce a způsob činnosti tribometrů s otáčivým hlavním pohybem**

### **3.2.1. Testovací zařízení typu čep-kotouč T-01M**

Slouží k hodnocení tribologických vlastností materiálů, které jsou užívány jako třecí páry v součástech strojů a zařízení. S jeho pomocí je možné určit odolnost materiálu proti opotřebení a třecí koeficient materiálu při klouzání po jiném materiálu, v závislosti na rychlosti skluzu, vnějších tlacích, přítomnosti a druhu maziva, znečištění a jiných prvcích.

Testovací zařízení umožňuje provádět měření v souladu s metodami uvedenými v normách ASTM G99 oraz DIN 50324.

#### **Technická charakteristika:**

Testovací zařízení T-01M je vybaveno systémem řízení a měření s mikroprocesorem, který umožňuje:

- kalibraci a testování měřících drah,
- řízení průběhem testu,
- provádění měření: odpory proti pohybu v třecím uzlu, teploty okolí testovaného dotyku, otáčivé rychlosti vřetena, počet otáček nebo čas trvání testu,



- archivaci naměřených výsledků,
- zpracování a export výsledků testu.

Software požitý v mikroprocesorové tribologické sestavě umožňuje provádět zkoumání podle standardních testovacích procedur a také umožňuje provádět modifikaci těchto procedur v závislosti na požadavcích uživatele [20].

### **Technické parametry:**

Parametry charakterizující třecí uzel:

- průměr čepů: 1/4''
- max. průměr kotouče: 40 mm
- rychlost skluzu:  $0,1 \div 0,6$  m/s
- zatížení dotyku: 50 N.



Obr.15. Testovací zařízení typu čep-kotouč [20].

### 3.2.2. Testovací zařízení typu váleček-destička T-05

Toto testovací zařízení s kombinací váleček-destička slouží k hodnocení mazacích hodnot plastických maziv, olejů a konzistentních maziv a také k měření odolnosti proti opotřebení v procesu tření mezi kovy a umělými hmotami, dále pak rovněž k měření odolnosti proti stírání snadno stíraných povlaků, které jsou nanášeny na vysoce zatěžované strojní části.

Testovací zařízení T-05 umožňuje provádět měření v souladu s metodami uvedenými v normách: ASTM D 2714, D 3704, D 2981 i G 77.

#### Technická charakteristika:

Díky aplikovanému konstrukčnímu řešení a výbavě zařízení je možno provádět testy v skluzovém dotyku s mazáním, nebo v dotyku suchém, při pohybu postupném nebo oscilačním s možností regulace rychlosti skluzu a amplitudy. Zkoumané dotykové pole může být zkoncentrováno nebo rozloženo. Je možná i regulace pracovní teploty třecího uzlu v průběhu zkoumání olejů. Velké možnosti regulace pracovních parametrů testovacího zařízení a jeho výbava umožňují modelovat pracovní podmínky skluzových třecích uzlů v širokém rozsahu.

Testovací zařízení **T-05** může být vybaveno mikroprocesorovým řídicím a měřicím systémem nebo analogovým měřicím systémem .

Tyto systémy umožňují provádět:

- měření:
- odporu proti pohybu v třecím uzlu,
- teploty hmoty zkušební vzorku,
- teploty hmoty mazacího materiálu,
- počtu otáček nebo délky trvání testu,

- archivaci výsledků měření

Mikroprocesorový řídicí a měřicí systém navíc umožňuje:

- řídit poháněcí motor a proces měření,
- regulovat:
  - otáčivou rychlost vřetena,
  - teplotu mazacího materiálu,
- počítačové zpracování výsledků měření.

Software mikroprocesorové sestavy umožňuje provádět zkoumání podle standardních testovacích procedur a také modifikovat tyto procedury podle požadavků uživatele [20].

**Technické parametry:**

- Parametry charakterizující třecí uzel:
  - druh dotykového pole: zkoncentrovaný přímkový nebo rozložený
  - průměr válečku: 35 mm
  - šířka destičky: 6,35 mm
  - druh pohybu: skluz, otáčivý nebo oscilační pohyb válečku,
  - rychlost skluzu:  $0,037 \div 5,5$  m/s
  - frekvence oscilačního pohybu:  $40 \div 500$  cyklů/min,
  - úhel oscilačního pohybu:  $0 \div 90^\circ$
  - zatížení dotykového pole:  $150 \div 3150$  N, stupňované po 150 N
  - způsob mazání: ponořením
- Rozměry měřicího zařízení: 680 x 500 x 350 mm
- Hmotnost měřicího zařízení: cca 105 kg
- Napájení měřicího zařízení: 3 x 380 V, 50 Hz
- Příkon: 1.5 kW.



Obr.16. Vzhled zařízení typu váleček.destička [20].

### 3.2.3. Testovací zařízení typu čep-kotouč (pro měření za zvýšených teplot)

Testovací zařízení T-11 se spojením čep-kotouč (koule-kotouč) je určeno k zjišťování tribologických hodnot materiálů, které jsou používány jako třecí páry součástí strojů a zařízení. S jeho pomocí lze určovat odolnost proti opotřebení a třecí koeficient daného materiálu při skluzu, v závislosti na rychlosti skluzu, vnějších tlacích, přítomnosti a druhu mazacího prostředku, teplotě okolí třecího uzlu, druhu plynu v testovací komoře a i jiných ukazatelích. Je také možné zkoumat i další jevy, jako například tribopolymerizaci a hraniční mazání. Testovací zařízení umožňuje provádět zkoumání v souladu s metodami definovanými v normách ASTM G99 a DIN 50324.

#### Technická charakteristika:

Testovací zařízení T-11 je vybaveno mikroprocesorovým řídicím a měřicím systémem, který umožňuje:

- kalibraci a testování měřicích drah,
- řízení průběhu testu,
- provádění měření:

- odporu proti pohybu ve třecím uzlu,
- teploty okolí testovaného dotykového pole,
- teploty uchycení čepu (kuličky),
- lineárního posunu zkušební vzorku (opotřebení),
- otáčivé rychlosti vřetene,
- počtu otáček nebo času trvání testu;
- regulaci otáčivé rychlosti a teploty v testovací komoře,
- archivaci výsledků měření,
- zpracování a export výsledků testu.

Software mikroprocesorové tribologické sestavy umožňuje provádět zkoumání podle standardních testovacích procedur a také podle vlastních procedur uživatele [20].

**Technické parametry:**

- průměr čepů/kuliček 1/8" nebo 1/4"
- max. průměr kotouče 1"
- paprsek tření 0,10 mm
- min. rychlost skluzu 0,02 m/s
- max. rychlost skluzu 1,0 m/s
- max. zatížení dotykového pole 50 N
- možnost 100 N
- max. teplota v komoře 300 °C
- rozměry zařízení 750 x 300 x 450 mm
- hmotnost cca 50 kg
- napájení 380 / 50 V/Hz



Obr.17. Testovací zařízení T-11 pro tribologická měření metodou PIN-ON-DISK [8].

### 3.3. Vlastnosti používaného materiálů

Zkušební vzorky, které byly využity v rámci tribologických měření, byly vyrobeny z oceli AISI 316L. Tato ocel je kyselinovzdorná a je uzpůsobena k implantování do lidského organismu. Oceli určené k výrobě implantátů mají přesně určená chemická složení, která jim zajišťují paramagnetickou strukturu. Navíc pak za účelem získání lepší odolnosti proti důlkové korozi v prostředí tkání a tkáňových tekutin byla zavedena další podmínka týkající se koncentrace chromu a molybdenu: 3,3% mas Mo + % mas Cr >26.

Z této oceli jsou vyráběny jehly mezikostní dřeň, kostní desky, šrouby a matice, kostní hroty a dráty. Využití má také v zařízeních pro potravinářský a chemický průmysl.

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni
<0,03%	<1,0%	<2,0%	<0,045%	<0,015%	<0,011%	16,5-18,5%	2,0-2,5%	10,0-13%

Tab.1. Chemické složení oceli AISI 316 L [9]

UHMWPE se vyznačuje dokonalým biologickým souladem a je používán jako odkaz v testech zkoumajících biologický soulad jiných materiálů. Avšak velmi malé produkty opotřebení, vznikající v důsledku spolupráce kloubu, zvláště pak drobné části menší než jeden mikrometr, ačkoli nejsou chemicky toxické, mohou způsobovat chorobné změny

v okolí kloubní protézy. Malé hodnoty koeficientu tření pro třecí páry obsahující část z polyetylénu a také nedostatečná reakce organismu na tento materiál způsobily, že se stal skluzovým materiálem, který je používán v alloplastice kloubů. Ke kladným vlastnostem polyetylénu UHMWPE je možné počítat:

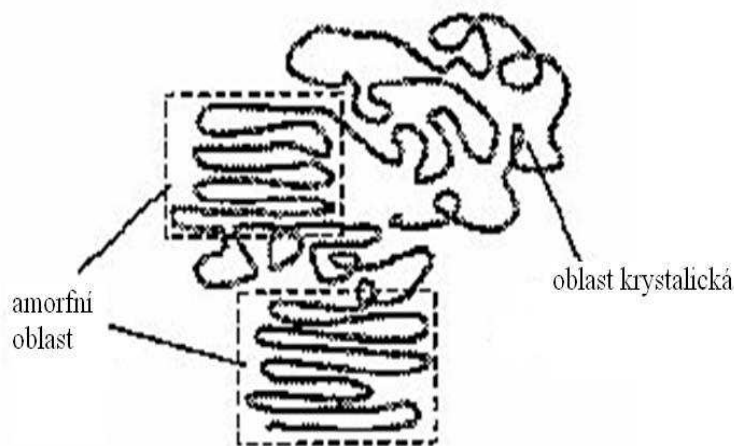
- dobré skluzové vlastnosti,
- sebemazací schopnost,
- odolnost proti tkáňovým tekutinám,
- dobré tlumení vibrací,
- dobrá obrábitelnost soustružením,
- poměrně nízká cena. [19]

Materiál	Mez kluzu[MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul [GPa]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Hmotnost průměrné molekulové hmotnosti [g/mol]
Polymer UHMWPE	≥21	≥42	≥3	0,94	1000000

Tab.2. Mechanické vlastnosti polymeru UHMWPE použitého v měřeních [10]

Typickou strukturou polymeru UHMWPE je semikrystalický stav, který obsahuje jak amorfni fázi, tak i oblasti obsazené krystaly. Polyetylén je velmi široce používaný polymer a je dostupný v mnoha obměnách. Polyetylén je obvykle charakterizován svou hustotou, s výjimkou polyetylénů s vysokou hustotou, které jsou charakterizovány svou molekulovou hmotností. Hlavní rozdíly mezi jednotlivými druhy polyetylénu spočívají v různém stupni rozvětvení, v jiné molekulové hmotnosti a v hustotě. Vysoce rozvětvené druhy polyetylénu většinou mají malou molovou hmotnost i hustotu. Materiály z lineárních polymerů mají větší molekulovou hmotnost i hustotu. Polyetylén s vysokou

hustotou (HDPE) a polyetylén UHMWPE jsou příkladem lineárních polymerů. UHMWPE má molekulovou hmotnost 12 až 15 násobně větší než HDPE. Avšak UHMWPE má nižší hustotu než HDPE z důvodu zvýšeného propletení řetězce, které omezuje stupeň krystalizace [10].

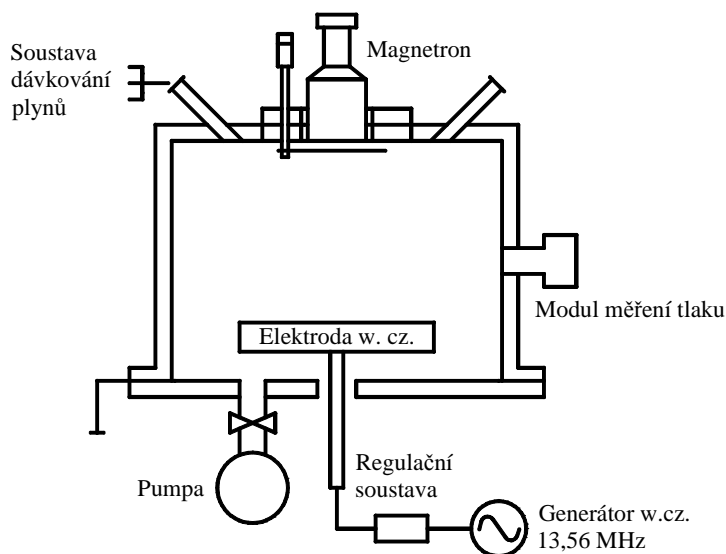


Obr.18. Schéma semikrystalické stavby polymeru UHMWPE [10].

### 3.4. Metoda magnetronového rozprašování ve vysokofrekvenčním poli RF-PACVD/DC

Metoda RF-PACVD/DC spočívá v nanášení gradientních vrstev (v rámci této práce Ti:C) spojením techniky stejnosměrného magnetronového rozprašování a chemického usazování z plynné fáze podporovaného plazmou. Takové řešení způsobuje zvýšení přilnavosti příslušné vrstvy k podkladu díky plynulému přechodu z kovové fáze k uhlíku. Zařízení pro nanášení gradientních vrstev je postaveno na bázi reaktoru RF a navíc se skládá z magnetronu napájeného impulzy stejnosměrného proudu. V horní části krytu komory se kromě systému pro dávkování plynů nacházejí dva průzory, které umožňují kontrolu procesů rozprašování a nanášení metodou optické emisní spektroskopie [23].





Obr.19. Schéma zařízení pro nanášení vrstev metodou RF-PACVD/DC [23].



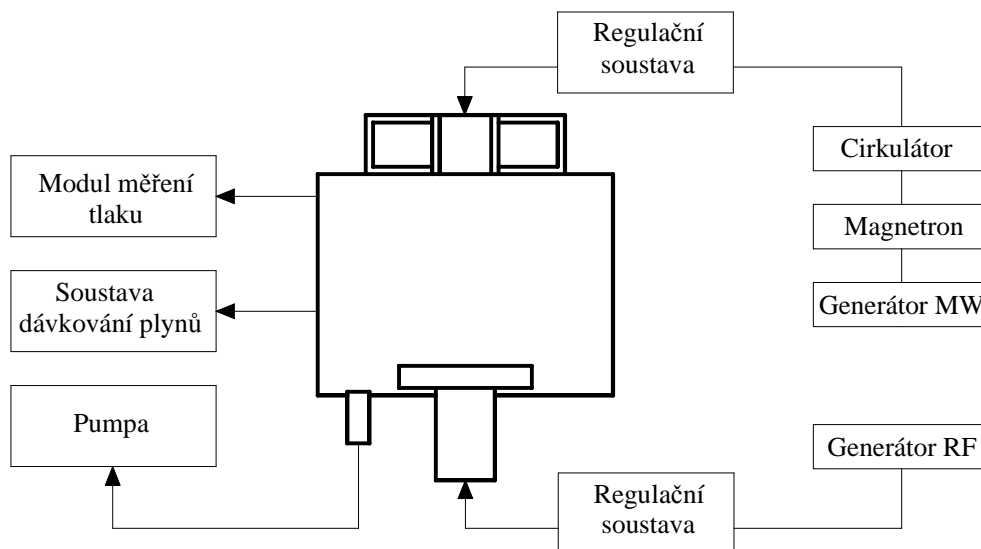
Obr.20. Stanoviště pro nanášení vrstev metodou RF-PACVD/DC. Laboratoř PŁ.

### 3.5. Plazmová metoda v dvoufrekvenčním poli MW/RF-PACVD

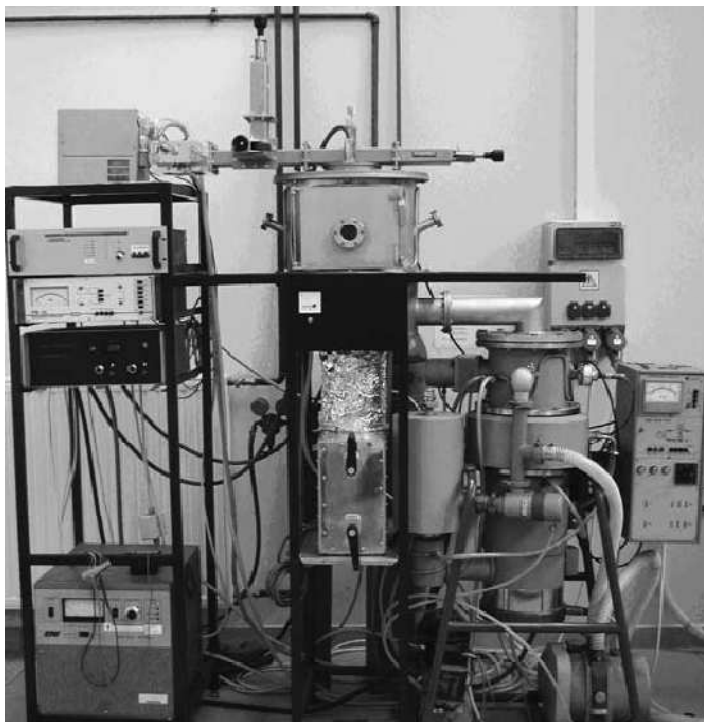
Metoda MW/RF-PACVD využívá dvě frekvence buzení plazmy: rádiovou (13,56 MHz) a mikrovlnnou (2,45 MHz) frekvenci. Toto řešení umožňuje v závislosti na použitých parametrech docílit uhlíkaté vrstvy od DLC po UNCD. Mikrovlnná plazma v soustavách MW/RF se vyznačuje vysokou hustotou proudu iontů a závisí na ní generování a stupeň ionizace aktivních částic, plazma s rádiovou frekvencí kontroluje proud a energii iontů.

Zařízení, které využívá metodu MW/RF-PACVD je vybaveno dvěma nezávislými zdroji buzení plazmy. Zdroj energie s rádiovou frekvencí je spojen s elektrodou pomocí

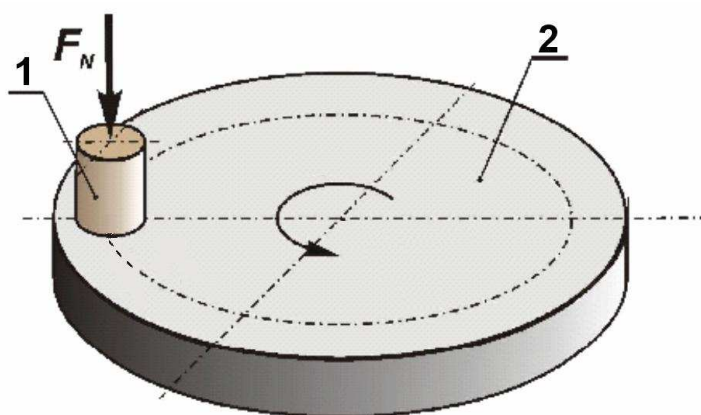
přizpůsobovacího systému, zatímco zdroj energie s mikrovlnnou frekvencí je spojen přes cirkulátor a přizpůsobovací systém s rezonanční komorou, která se nachází na protilehlé straně elektrody, v horní části stanoviště [24]



Obr.21. Schéma zařízení pro nanášení vrstev metodou MW/RF-PACVD [24].



Obr.22. Stanoviště pro nanášení vrstev metodou MW/RF-PACVD. Laboratoř PŁ.[7]



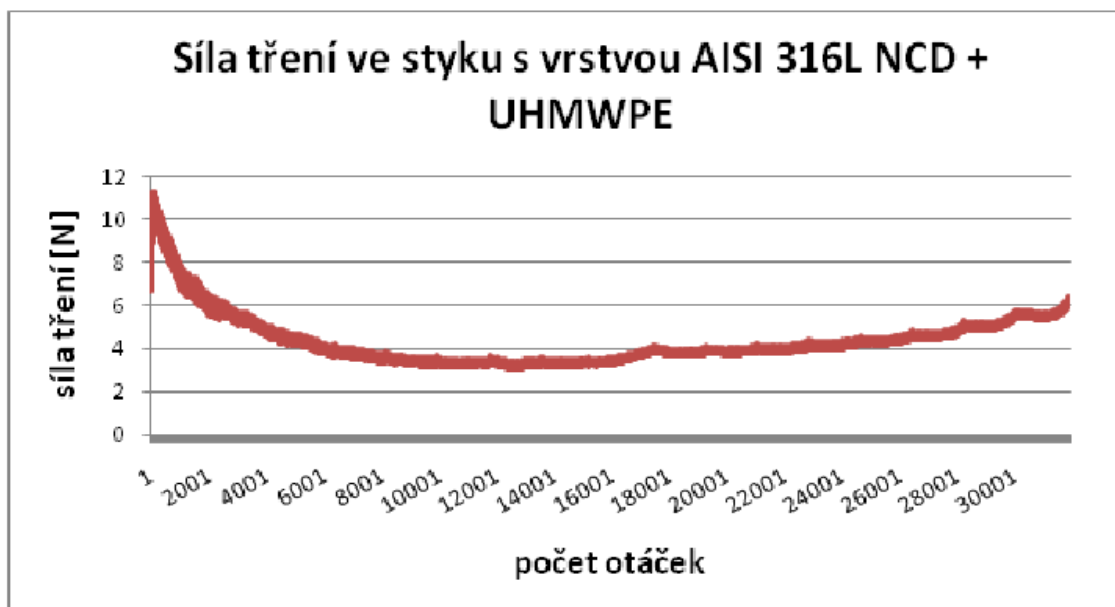
Obr.23. Realizovaný třecí uzel čep – disk

Parametry tření	zatížení [N]	prostředí	čas [S]	Draha tření [m]	Poloměr třecí [mm]	Otáčky [Obr/min]
	50	Destilovaná voda	50000	2500	8	60

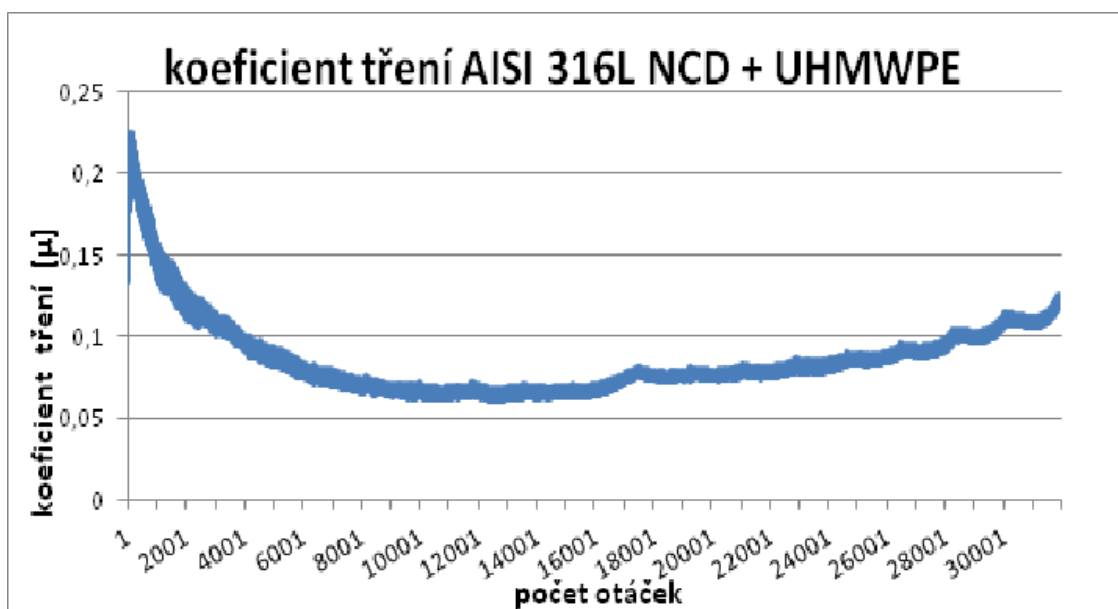
Tab.24. Parametry tření

### 3.6. Výsledky testů

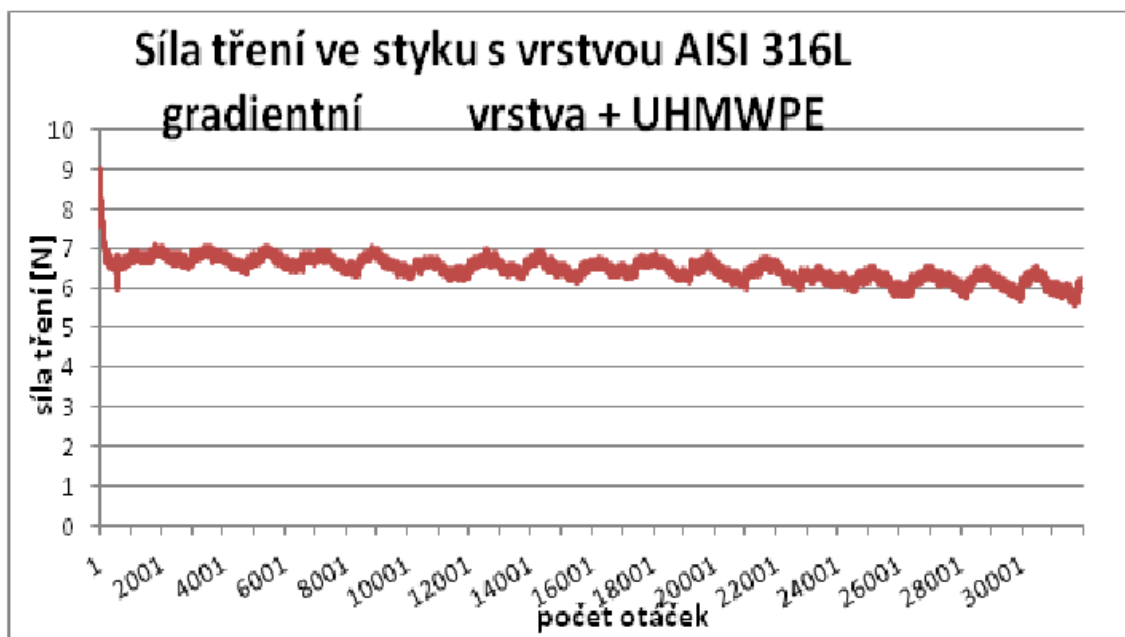
Tribologické výzkumy vzorků s navrstvením byly vykonány v Institutu materiálového inženýrství na Technické univerzitě v Lodži (Instytut Inżynierii Materiałowej na Politechnice Łódzkiej). Výzkum byl proveden metodou „Pin-On-Disk” testerem T-11.



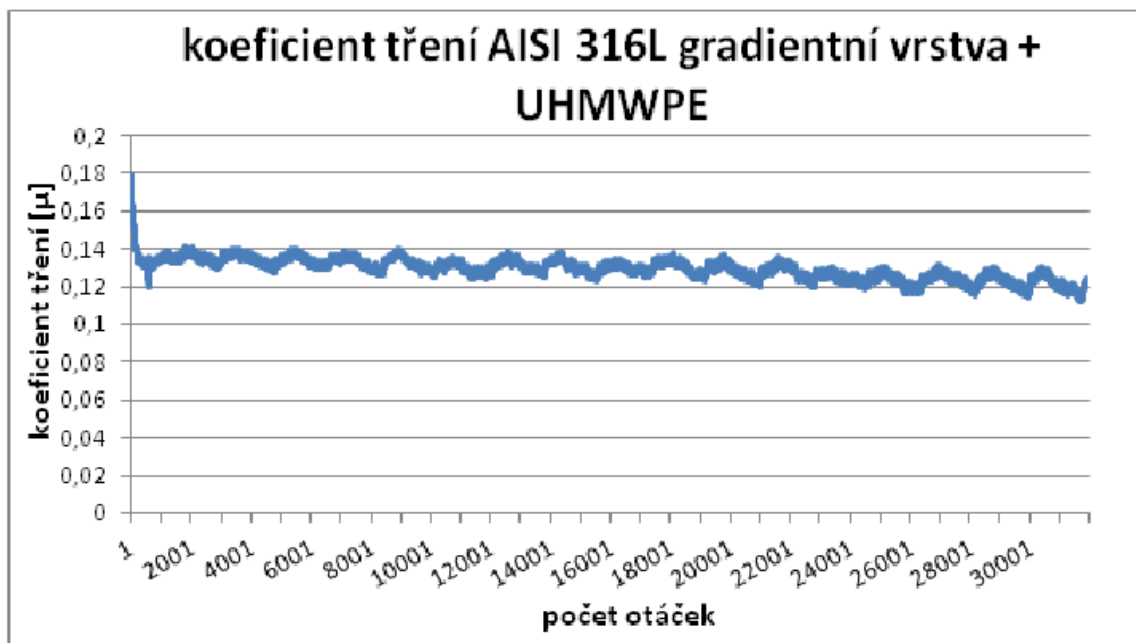
Obr.24. Průběh třecí síly pro ocel AISI 316 L z vrstveným materiálem NCD, který je sloučen s polyetylénem UHMWPE



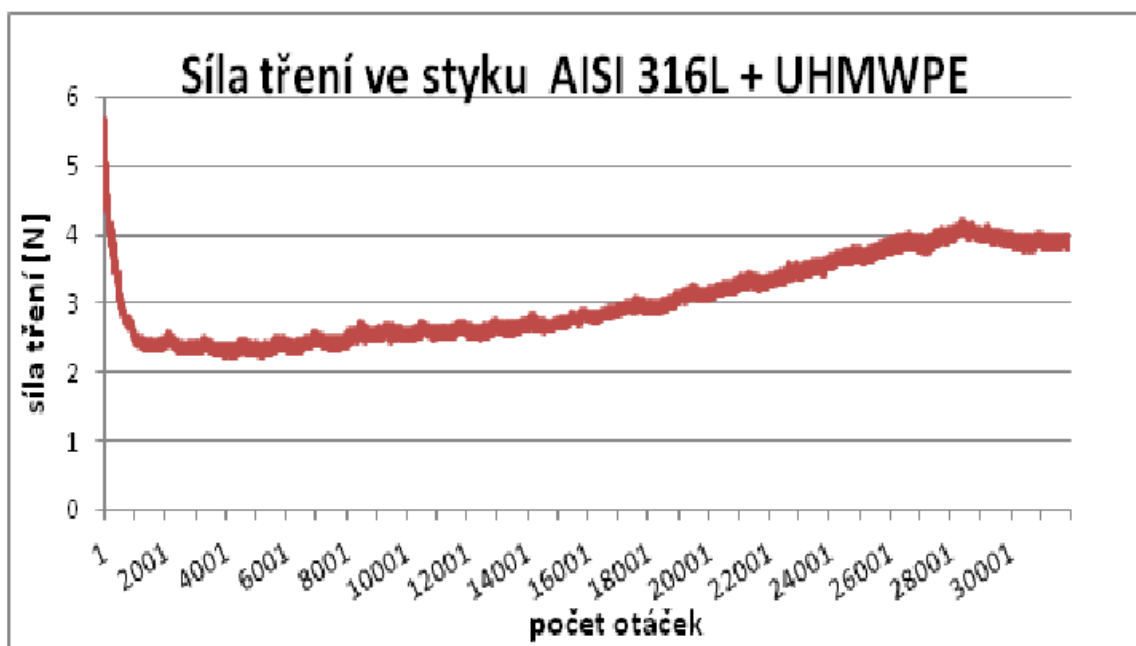
Obr.25. Průběh spoučinitele tření v čase zkoušky ocele AISI 316 L z vrstveným materiálem NCD, který je sloučen s polyetylénem UHMWPE



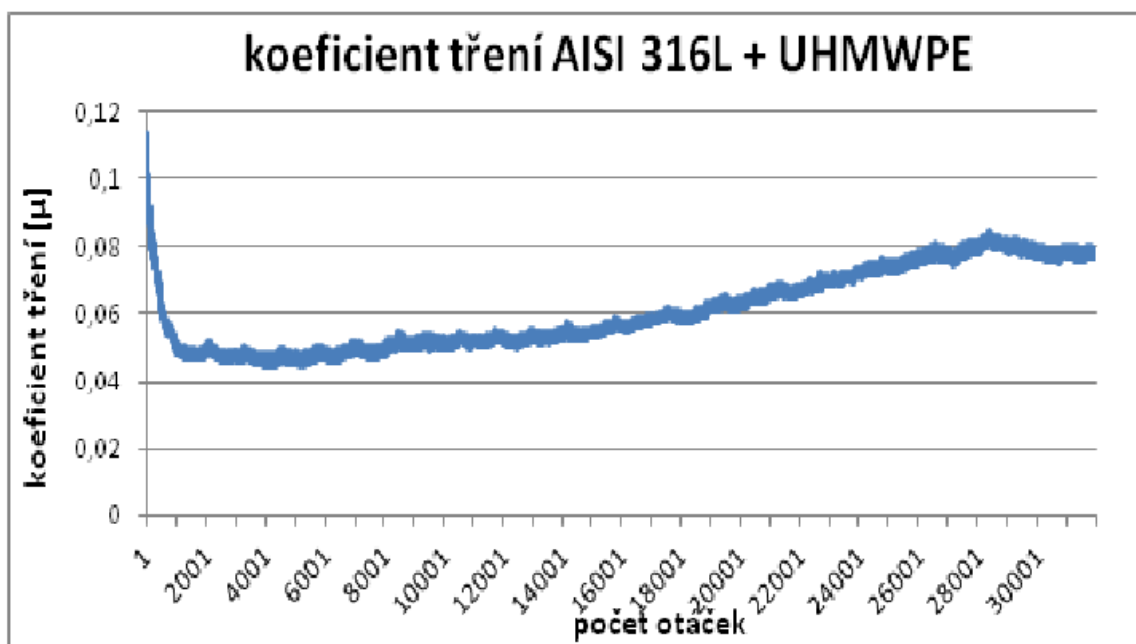
Obr.26. Průběh třecí síly pro ocel AISI 316 L z nanesenou gradientovou vrstvou spojenou z polyetylénem UHMWPE



Obr.27. Průběh spoučinitele tření pro ocel AISI 316 L z nanesenou gradientovou vrstvou spojenou z polyetylénem UHMWPE



Obr.28. Průběh třecí síly pro ocel AISI 316 L spojenou z polyetylénem UHMWPE

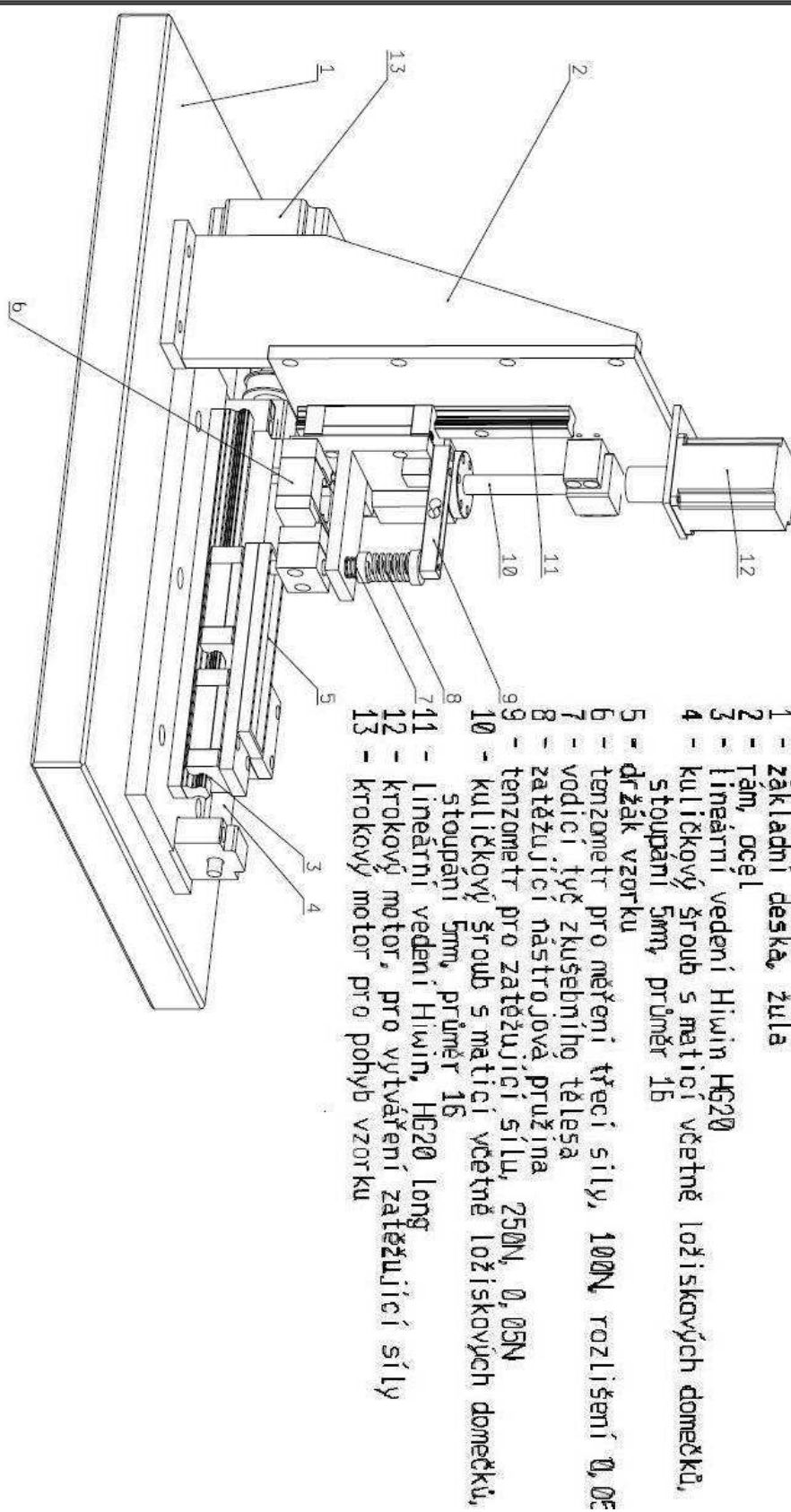


Obr.39. Průběh součinitele tření pro ocel AISI 316 L spojenou z polyetylénem UHMWPE

#### **IV. Opis a způsob použití zařízení**

Navržené zařízení slouží výzkumu tribologických charakteristik materiálových spojů, které se smykově dotýkají v posuvno-zpětném pohybu. Zkoumány budou difúzní vrstvy a vrstvy tenké, které jsou nanášeny metodami PVD i CVD, taktéž materiály po tepelném zpracování, rovněž polymerové materiály.

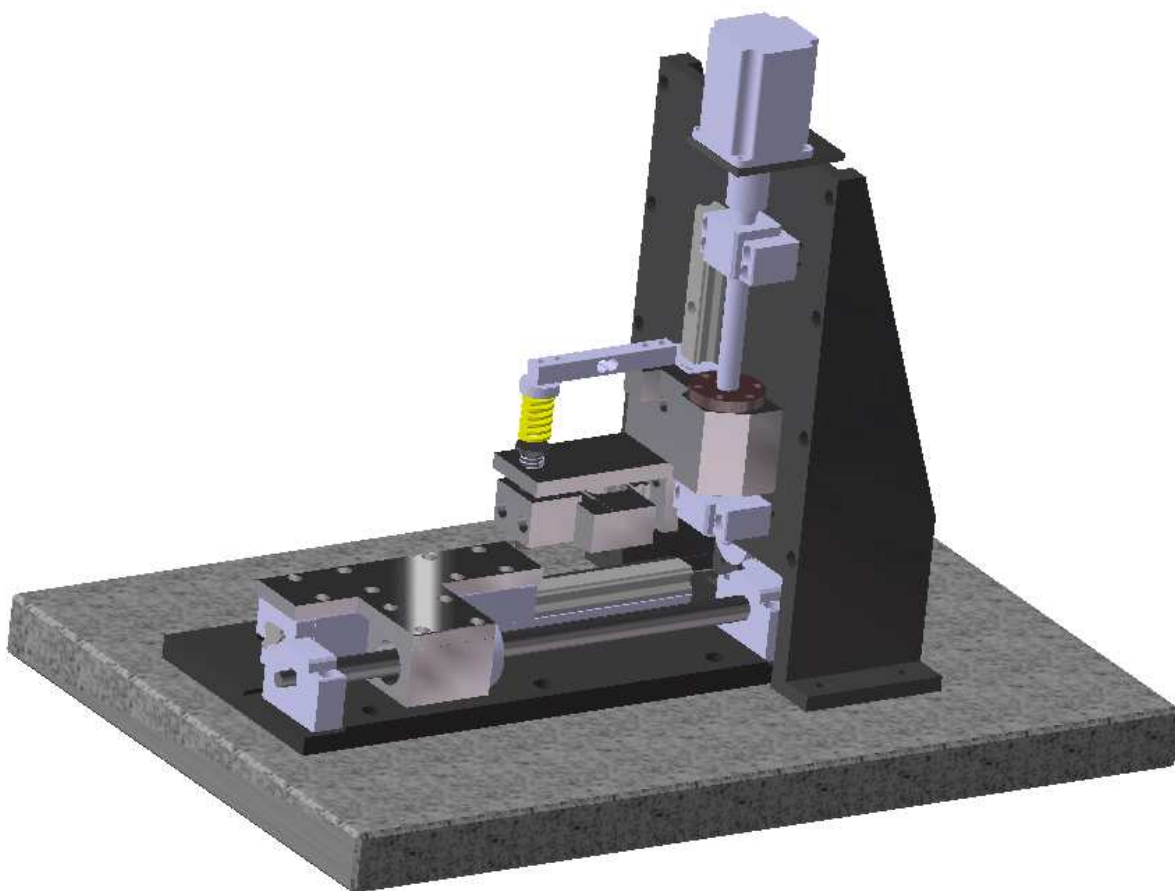
Konstrukce tribometru se skládá z žulové desky, na které je umístěna ocelová deska. K ocelové desce je přimontován krokový motor z kuličkovým šroubem, který umožňuje posouvání dolního vzorku. Na matici kuličkového šroubu se nachází spojovací článek, ke kterému je upevněna základna. Na ní je přišroubován držák, na který se upíná vzorek. Pro dolní vzorek se předpokládá tvar kvádru s rozměry desky  $30 \times 15$  mm a výškou 5 mm. Kvůli zvýšení pevnosti podkladu, snížení otřesů zařízení a přenesení zatížení z kuličkového šroubu je rovnoběžně k ní je umístěna otočná vodící lišta. Tvar připojeného prvku podporuje vysokou stabilitu i při vysokých zatíženích, proto jsou eliminovány pružné deformace a výslední provozní poruchy. V zadní části zařízení se nachází ocelové rameno, které zabezpečuje vysokou stabilitu celého systému. Na tomhle rameně je připevněna vodící lišta, umožňující zvedání a spouštění celé soustavy, součástí které je tenzometr pro měření třecí síly, tenzometrický měřič zatížení a prvky, zatěžující vrchní vzorku. Pro vrchní vzorku se předpokládá tvar válce s průměrem 8mm a výškou 15mm. Zvedání a spouštění celé sestavy zajišťuje krokový motor. Motor je řízen počítačem, slouží k zadávání zatížení na třecím uzlovém bodu. Zařízení funguje tak, že je vytvářen tlak na pružinu, která tlak přenáší přímo na vzorku.



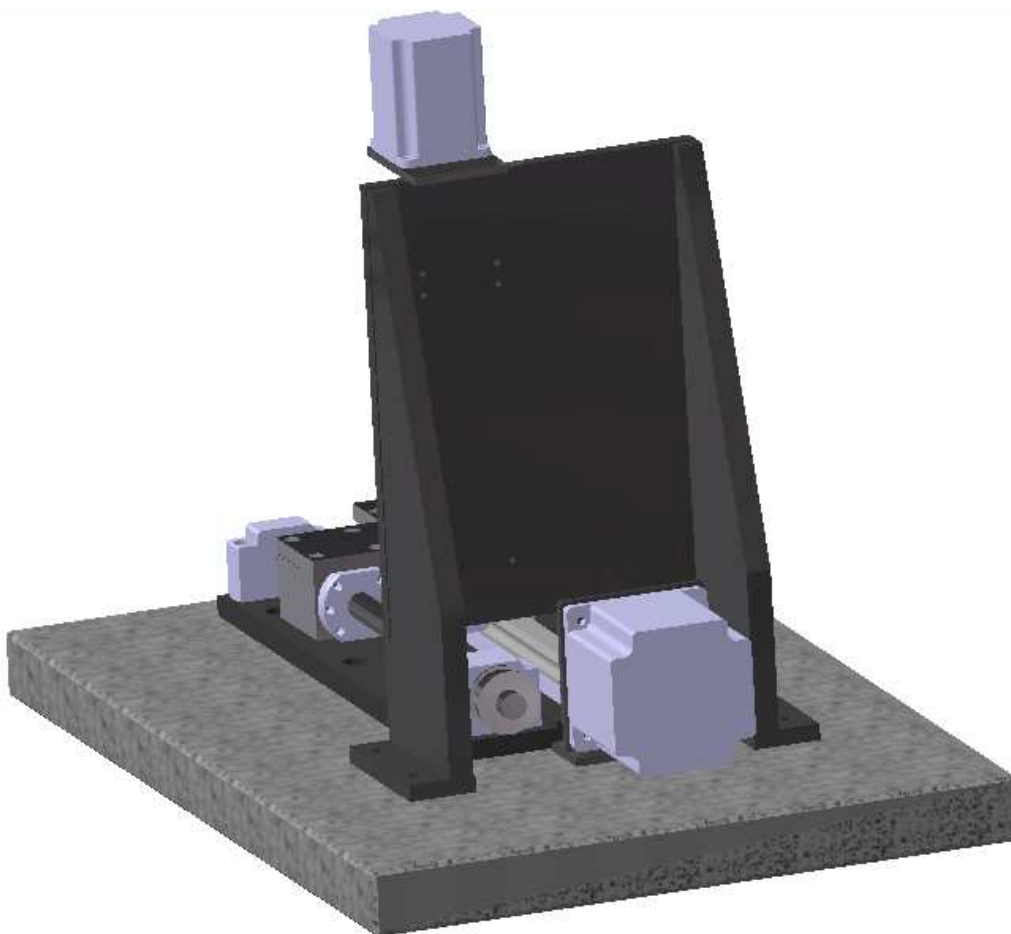
Obr. 30. Tribometr sestava



Největším problémem při konstruování takového typu zařízení jsou otřesy, které vznikají během vzájemného posunu dvou rovných povrchů po sobě. Proto je nutno při konstrukčních pracích dbát na pevnost všech elementů. Kromě toho je důležité, aby držák, na kterém se upíná vzorek, měl příslušný tvar. Jeho tvar umožní výraznou měrou minimalizovat otřesy horní vzorky, z které je odčítávána třecí síla. Je třeba věnovat pozornost, aby tensometr měřil jenom sílu tření, nikoli ku příkladu hodnoty momentů, ohýbajících vzorek. Zařízení má být spojeno s počítačem, na kterém bude nainstalován příslušný program, umožňující kontinuální vkládání a regulaci zatížení propojení ploch. Navíc bude umožněno programovat grafy přemístění vzorky v čase.



Obr. 31. Celkový pohled na zařízení.



Obr. 32. Pohled v zadu

## V. Diskuse o výsledcích a návrhy

Polyetylén UHMWPE a ocel AISI 316L jsou běžně používány v lékařnictví pro různé druhy výrobků, které spojují a vyztužují kostní zlomeniny. Rovněž se vzájemně dotýkají, např. jako pánev vložky a hlava (hlavice) protézy.

Třecí testy byly vykonány v destilované vodě, protože kvůli dlouhému času zkoušky se třecí prvky značně prohřívaly a vzorky se odlepovaly od upínací pásky. Takové parametry jsou vybrané ze vzhledu na nízký součinitel tření polyetylénu spojeného s gradientovou vrstvou, NCD a ocelí, jak rovněž ze vzhledu na dobré valivé vlastnosti, aby se daly prozkoumat změny v smykovém doteku. Obrázek ukazuje, že třecí síla na začátku zkušebního procesu má výrazně zvýšenou hodnotu. Tyhle parametry jsou důsledkem počáteční fáze, ve které se dotýkající povrchy postupně vzájemně obroušují a po obroušení parametry oscilují kolem dané hodnoty až do konce zkušebního procesu. V případě testu z nemodifikovaným povrchem nastává po stabilizaci po určitém čase nárůst síly postupně narůstá. Může to být způsobeno postupným stíráním dotýkajících se povrchů. Tenhle jev nastává, protože ocel má nižší hodnoty valivého odporu jako gradientové vrstvy.

Uskutečněná analýza různých konstrukčních typů tribometrů ukazuje, že experimentální zařízení a měřicí přístroje pro zkoumání třecích spojů, kterých hlavním pohybem je otáčivý pohyb, dávají vynikající výsledky, porovnatelné se skutečnými třecími body ve kterých převládají stabilní pracovní podmínky. Přednostmi těchto přístrojů jsou široké možnosti regulace pracovních parametrů, tj. zatížení, rychlost klouzání, teplota a přítomnost mazací látky. Podle druhu vybavení můžeme zkoumat teplotu vzorku a též lineární opotřebení obou třecích materiálů. Zařízení můžou pracovat i při vysokých zatíženích a doteková plocha může být koncentrována na přímce, nebo může být rozmístěna podle geometrie vzorku.

Výsledkem přehledu literatury je zjištění, že jsou rovněž konstrukční řešení, které mohou provádět výzkum jak při statickém, tak i při vzestupném zatížení vzorků. Výzkum takového třecího bodu se může uskutečnit v podmínkách suchého technického tření, rovněž může být jednorázově mazán plastickým mazadlem nebo zkoumán ponornou metodou.

Hlavní nedostatek těchto zařízení je v nemožnosti výzkumu v podmínkách, které nastávají v případě zahájení pohybu. Jsou to důležité faktory, protože mnoho elementů různých zařízení a přístrojů pracuje s malými rychlostmi pohybu, leč při častých zahájeních a zastaveních práce, rovněž i při změnách směru pohybu, jako při smykových vodících lištách. Vstříc jsou vytvořeny testery, které pracují v posuvně zpětném pohybu. Tyhle zařízení můžou měnit v určitém rozsahu amplitudu, frekvenci a počet cyklů. Podobně jak na předcházejících zařízeních se na nich může měřit teplota vzorku, mazací tekutiny, zkoumat technický suchý dotyk. Protože všechny zařízení jsou spojeny s počítačem, můžou se testovat vyměřovací dráhy nebo jejich kalibrace. Umožněna je rovněž archivace a zpracování výsledků výzkumu a vydávání výsledků zkoumání.

## VI. Závěr

Obecně existuje čím dál tím větší potřeba zkoumání a důkladného popisu jevů, které jsou spojeny s třecím procesem. Jejich důkladný popis a poznání umožňuje konstrukci strojů a zařízení s čím dál tím menšími ztrátami, spojenými s překonáváním třecího odporu.

**Cílem mojí práce bylo navrhnout zařízení pro výzkum tření v posuvném a otáčivém pohybu a sestavení hlavních kontrolních a měřících prvků.**

Činnost se skládala z dvou základních částí. Teoretická část popsala nejdůležitější tribologické modely a základní formy opotřebení. V praktické části jsou charakterizovány testovací zařízení pro výzkum tření a opotřebení. Popsaná je metodika vrstvicí metody RF-PACVD/DC a MW/RF-PACVD. Uskutečnili se tribologické testy za účelem porovnání s výsledky, které budou dosahovány na navrženém zařízení.

Tribologické výzkumy vzorků s navrstvením byly vykonány v Institutu materiálového inženýrství na Technické univerzitě v Lodži (Instytut Inżynierii Materiałowej na Politechnice Łódzkiej). Výzkum byl proveden metodou „Pin-On-Disk” testerem T-11. Přístroj registroval třecí sílu a opotřebení. Test byl vykonán v pokojové teplotě s použitím destilované vody, která byla použita jako chladící a mazací tekutina. Výsledky výzkumu jsou uvedeny v diagramech (obr.17).

## **VII. Seznam obrázků a tabulek**

**Obr. 1.** Forma vodíkového opotřebení ocele spolupracující s textolitovými součástkami [6]

**Obr. 2.** Zvětšení jediné zlomeniny [14].

**Obr. 3.** Schéma vzniku opotřebení třením [18].

**Obr. 4.** Forma opotřebení třením [12].

**Obr. 5.** Schéma vlastností povrchu únavových zlomů [25].

**Obr. 6.** Únavový lom ráfku pojezdového kola lokomotivy[11] (vlevo), kolejnička-únavový lom [21](vpravo).

**Obr. 7.** Fotografie důsledků a forem opotřebení pittingem [7]

**Obr. 8.** Pitting – schéma vzniku zárodku a šíření praskliny v povrchové vrstvě u normálního typu (dlouhodobé) stykové únavy [1,2].

**Obr. 9.** Pitting – schéma vzniku zárodku a šíření praskliny v povrchové vrstvě u katastrofálního typu stykové únavy [1,2].

**Obr. 10.** Drážka ložiska opotřebovaná spallingem [5].

**Obr. 11.** Schéma vzniku adhezivního přilnutí [18].

**Obr. 12.** Celkový pohled na zařízení pro zkoumání tření při vratném pohybu [20]

**Obr. 13.** Stanoviště pro tribologická měření při cyklickém točivě-kluzném pohybu

**Obr. 14.** Celkový pohled na zařízení TPZ

**Obr. 15.** Testovací zařízení typu čep-kotouč

**Obr. 16.** Vzhled zařízení typu váleček.destička

**Obr. 17.** Testovací zařízení T-11 pro tribologická měření metodou PIN-ON-DISK [8].

**Obr. 18.** Schéma semikrystalické stavby polymeru UHMWPE

**Obr. 19.** Schéma zařízení pro nanášení vrstev metodou RF-PACVD/DC [23].

**Obr. 20.** Stanoviště pro nanášení vrstev metodou RF-PACVD/DC. Laboratoř PŁ.

**Obr. 21.** Schéma zařízení pro nanášení vrstev metodou MW/RF-PACVD [24].

**Obr. 22.** Stanoviště pro nanášení vrstev metodou MW/RF-PACVD. Laboratoř PŁ.[7]

**Obr. 23.** Realizovaný třecí uzel čep – disk

**Obr. 24.** Průběh třecí síly pro ocel AISI 316 L z vrstveným materiálem NCD, který je sloučen s polyetylénem UHMWPE

**Obr. 25.** Průběh součinitele tření v čase zkoušky ocele AISI 316 L z vrstveným materiálem NCD, který je sloučen s polyetylénem UHMWPE

**Obr. 26.** Průběh třecí síly pro ocel AISI 316 L z nanesenou gradientovou vrstvou spojenou z polyetylénem UHMWPE

**Obr. 27.** Průběh součinitele tření pro ocel AISI 316 L z nanesenou gradientovou vrstvou spojenou z polyetylénem UHMWPE

**Rys. 28.** Průběh třecí síly pro ocel AISI 316 L spojenou z polyetylénem UHMWPE

**Rys. 29.** Průběh součinitele tření pro ocel AISI 316 L spojenou z polyetylénem UHMWPE

**Obr. 30.** Tribometr sestawa

**Obr. 31.** Celkový pohled na zařízení.

**Obr. 32.** Pohled v zadu

**Tab. 1.** Chemické složení oceli AISI 316 L [9]

**Tab. 2.** Mechanické vlastnosti polymeru UHMWPE použitého v měřeních [10]

**Tab. 3.** Parametry třen

## VIII. Literatura

- [1] Marek Blicharski Inżynieria powierzchni Wydawnictwo naukowo techniczne Warszawa 2009
- [2] Zbigniew Lawrowski Tribologia Tarcie, zużycie, smarowanie oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2008
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją M. Szczerka i M. Wiśniewskiego „Tribologia i Tribotechnika”, Radom 2000, s.306÷332. ISBN 83-7204-199-7.
- [4] Piotr Kula Inżynieria warstwy wierzchniej wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 2000
- [5] URL<<http://www.eduforum.pl/modules.php?name=Publikacje>> [22.04.2009]
- [6] Leszek A. Dobrzański Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe Wydawnictwa Naukowo- Techniczne 2006
- [7] URL <<http://www.fzu.cz/struktura/casopisy/jemnam/2007/Jmo-03>> [22.04.2009]
- [8] URL < <http://www.tribologia.org>> [22.04.2009]
- [9] URL <[http://pl.wikipedia.org/wiki/Stal\\_kwasoodporna](http://pl.wikipedia.org/wiki/Stal_kwasoodporna)> [22.04.2009]
- [10] URL <<http://uranos.cto.us.edu.pl/~knm/podstr/wmfncpt.htm>> [22.04.2009]
- [11] URL <http://waldemarziaja.sd.prz.edu.pl/file/MjMsNjcsODM3LDAwNi5wZGY>> [22.04.2009]
- [12] URL <<http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bpl/pol/02-applications/01-wear-tribology/01-abrasive-wear/indexW3DnavidW263.php>> [22.04.2009]
- [13] DRUET K., KRÓL M.: Tribometr TPZ. III Międzynarodowe Sympozjum INSYCONT. Materiały. Wydawnictwo AGH, Kraków 1990, s. 617-621
- [14] URL <[http://www.ndt-imbn.com/seminaria/07/Zakopane\\_07-Lusa.pdf](http://www.ndt-imbn.com/seminaria/07/Zakopane_07-Lusa.pdf)> [22.04.2009]
- [15] URL <<http://images.google.pl/imgres?imgurl=http://www.stork-gears.com/images/photogallery/goldmine>> [25.04.2009]
- [16] URL [http://www.kkiem.mech.pg.gda.pl/files/Lab/Rodzaje\\_zuzyciaA4.pdf](http://www.kkiem.mech.pg.gda.pl/files/Lab/Rodzaje_zuzyciaA4.pdf)> [25.04.2009]
- [17] Z. Gawroński „Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych“ Politechnika Łódzka Monografie 2005
- [18] URL <<http://www.pg.gda.pl/mech/kim/M%20Dobor%204-4-got.pdf>> [22.04.2009]
- [19] Gierzyńska-Dolna M.: Biotribologia. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowawa 2002
- [20] URL <<http://www.itee.radom.pl>> [22.04.2009]
- [21] M.J.Neale, The Tribology Handbook, Elsevier, 1995



- [22] Kowalewski P., Wieleba W., Leśniewski T.: Stanowisko do badań tribologicznych w złożonym ruchu cyklicznym toczno-ślizgowym. Tribologia, R. 38, nr 2, (2007), 303-311.
- [23] BATORY D., CŁAPA M., MITURA S. Warstwy gradientowe Ti:C wytwarzane w plazmie RF PACVD z udziałem rozpylania magnetronowego. Inżynieria Materiałowa NR 5/2006
- [24] KACZOROWSKI W., NIEDZIELSKI P., CŁAPA M., MITURA S. Charakteryzacja warstw węglowych wytwarzanych metodą MW/RF PACVD. Inżynieria materiałowa NR 5/ 2005
- [25] URL <<http://www.pg.gda.pl/mech/kim/rymkiewicz/21-22%20Degradacja%20materialow.pdf>> [22.04.2009]
- [26] URL <<http://www.vibanalysis.co.uk/.../vibch12/vibch12p1.gif>> 18.04.2009]
- [27] URL <<http://www.ilot.edu.pl/KONES/2002/01/str72.pdf>> [4.05.2009]
- [28] URL <<http://www.mm.pl/~inzynieria/fizykochemia%20powierzchni>> [4.05.2009]
- [29] URL [www.eduforum.pl/modules.php?name=Publikacje&d\\_op=getit&lid=1637](http://www.eduforum.pl/modules.php?name=Publikacje&d_op=getit&lid=1637) [5.05.2009]

